

SÉRIE A. 844
D'ORDRE 1643

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

M. André MARCELIN

1^{re} THÈSE. — PROPAGATION ET RÉCEPTION DES SONS DANS L'EAU.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Soutenues le 2^{ème} juin 1920, devant la Commission d'Examen

MM. URBAIN, *Président*

JEAN PERRIN

MAURAIN

DE BROGLIE

PARIS

IMPRIMERIE GÉNÉRALE LAHURE

9, RUE DE FLEURUS, 9

—
1920

ÉRIE A. 844
D'ORDRE 1645

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

M. André MARCELIN

1^{re} THÈSE. — PROPAGATION ET RÉCEPTION DES SONS DANS L'EAU.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Soutenues le . juin 1920, devant la Commission d'Examen



MM. URBAIN, *Président*
JEAN PERRIN
MAURAIN
DE BROGLIE

PARIS
IMPRIMERIE GÉNÉRALE LAHURE
9, RUE DE FLEURUS, 9

—
1920

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen. F. HOUSSAY, *Professeur. Zoologie.*

Professeurs honoraires.
 { P. PUISEUX.
 { VÉLAIN.
 { BOUSSINESQ.

Professeurs.
 { LIPPMANN. Physique.
 { BOUTY. Physique.
 { E. PICARD. Analyse supérieure et algèbre supérieure.
 { Y. DELAGE. Zoologie, anatomie, physiologie comparée.
 { Gaston BONNIER. Botanique.
 { KENIGS. Mécanique physique et expérimentale.
 { GOURSAT. Calcul différentiel et calcul intégral.
 { HALLER. Chimie organique.
 { JOANNIS. Chimie (Enseignement P. C. N.)
 { JANET. Physique.
 { WALLERANT. Minéralogie.
 { ANDOYER. Astronomie.
 { PAINLEVÉ. Mécanique analytique et mécanique céleste.
 { HAUG. Géologie.
 { H. LE CHATELIER. Chimie.
 { Gabriel BERTRAND. Chimie biologique.
 { M^{me} P. CURIE. Physique générale.
 { CAULLERY. Zoologie (Évolution des êtres organisés).
 { G. CHABRIÉ. Chimie appliquée.
 { G. URBAIN. Chimie.
 { Émile BOREL. Physique mathématique et Calcul des probabilités.
 { MARCHIS. Aviation.
 { Jean PERRIN. Chimie physique.
 { G. PRUVOT. Zoologie, anatomie, physiologie comparée.
 { MATRUCHOT. Botanique.
 { ABRAHAM. Physique.
 { CARTAN. Mécanique rationnelle.
 { Cl. GUICHARD. Géométrie supérieure.
 { MOLLIARD. Physiologie végétale.
 { LEBESGUE. Application de l'analyse à la géométrie.
 { LAPICQUE. Physiologie.
 { GENTIL. Géographie physique.
 { VESSIOT. Calcul différentiel et calcul intégral.
 { COTTON. Physique théorique et Physique céleste.
 { N... Histologie.
 { N... Mathématiques générales.

Professeurs adjoints { LÉJUC. Physique.
 { HÉROUARD. Zoologie.
 { Léon BERTRAND. Géologie
 { Rémy PERRIER. Zoologie (Enseignement P. C. N.).
 { LESPIEAU. Chimie.
 { SAGNAC. Physique (Enseignement P. C. N.).
 { PEREZ. Zoologie (Évolution des êtres organisés).
 { RABAUD. Biologie générale.
 { PORTIER. Physiologie.
 { BLAISE. Chimie organique.
 { PÉCHARD. Chimie (P. C. N.).

Secrétaire D. TOMBECK.

A LA MÉMOIRE DE MON FRÈRE

RENÉ MARCELIN

Tué à Beaumont (près Verdun)

le 24 Septembre 1914.

A MON MAITRE

JEAN PERRIN

Sincère témoignage de reconnaissance
et de respectueuse affection.

AVANT-PROPOS

L'étude des phénomènes acoustiques dans l'eau n'avait pas fait l'objet de recherches nombreuses avant 1914, et je ne vois pas qu'on puisse citer de travaux importants dans cet ordre d'idées en dehors des expériences célèbres de Colladon et Sturm pour déterminer par une méthode directe la vitesse du son dans l'eau. On comprend facilement qu'il en ait été ainsi, les moindres expériences en mer nécessitant un matériel et un personnel important, dont ne disposent pas généralement les laboratoires.

On sait que Colladon et Sturm ont opéré sur le lac de Genève, mesurant la vitesse du son entre deux postes flottants distants de 15 500 mètres. La source de son était une cloche; l'appareil récepteur était un cornet acoustique dont la partie élargie fermée par une membrane était plongée dans l'eau et orientée perpendiculairement à la direction de propagation du son. La vitesse de propagation du son dans l'eau fut trouvée égale à 1435 mètres par seconde; rappelons pour mémoire qu'elle n'est que de 350 mètres par seconde dans l'air; soit un peu plus de quatre fois moindre que dans l'eau.

Pendant la guerre, la nécessité de combattre l'ennemi invisible qu'est le sous-marin, fixa l'attention des physiciens sur les questions d'acoustique sous-marine; des sacrifices importants furent consentis tant en France que dans les pays alliés, particulièrement en Angleterre, puis en Amérique, pour permettre de poursuivre des recherches dans cette voie: c'est ainsi que fut créé à Toulon, en Janvier 1916, sur l'initiative de M. Painlevé, et avec l'aide matérielle des services de la marine, un centre d'études maritimes dépendant de la direction des Inventions et recherches techniques.

Des analogies connues ou probables entre phénomènes acoustiques dans l'eau et dans l'air, d'une part, entre phénomènes optiques et acoustiques d'autre part, ont généralement servi de base à toutes les inventions.

Quoi qu'il soit admis que la résolution du problème de l'écoute sous-marine est difficile, on s'explique le succès ou l'insuccès de chaque tentative en ne perdant pas de vue que: 1° pour des sons de même fréquence, les longueurs d'onde dans l'eau sont plus de quatre fois plus grandes que dans l'air, et que: 2° les longueurs d'onde correspondant au spectre visible de la lumière sont en moyenne 10^7 fois plus petites que les longueurs d'ondes sonores dans la mer. C'est donc dans les phénomènes d'optique physique et non pas d'optique géométrique que les

analogies directives devaient être recherchées. Pour fixer un ordre de grandeur, je précise, et cela met en lumière la difficulté du problème, que nous nous trouvons dans les mêmes conditions pour étudier les phénomènes acoustiques dans l'eau qu'un être microscopique qui ne connaîtrait des phénomènes optiques que ceux qui sont limités par deux traits consécutifs d'un réseau; précisément, nous ne savons rien des phénomènes d'optique envisagés à cette échelle.

Seul collaborateur de M. J. Perrin, au centre d'études de Toulon, pendant deux années, je me suis trouvé naturellement amené à faire certaines études acoustiques qui me paraissent présenter un intérêt scientifique.

Il nous a semblé, qu'il serait plus intéressant de publier un travail d'ensemble sur les travaux auxquels j'ai collaboré, que de limiter la publication à celle des études qui me sont personnelles.

Ma contribution scientifique au travail fait en collaboration a porté principalement sur les deux points suivants :

1° Étude et réalisation du microphone.

J'ai montré comment, par un choix judicieux, des inerties et des amortissements, on pouvait se rendre maître des propriétés acoustiques des microphones pour l'écoute sous-marine, les insensibiliser à certaines longueurs d'ondes nuisibles et aux fluctuations de pression dues à la houle et au roulis, et au contraire augmenter leur sensibilité pour les longueurs d'onde qui constituent principalement les bruits des navires.

2° Étude du milieu propagateur et des phénomènes acoustiques dont il est le siège.

J'ai pensé qu'en dehors de la source de son (bruits des navires) et des appareils d'écoute, les conditions dans lesquelles le son se propage dans la mer, devaient être soigneusement étudiées; j'ai été amené ainsi à mettre en évidence des phénomènes interférentiels dont l'importance est considérable, et à expliquer que des mirages acoustiques limitent irrémédiablement la portée des appareils d'écoute, si perfectionnés que soient ces derniers.

L'étude qu'on va lire débute par un exposé général sur la question, comprenant la description sommaire des principaux appareils réalisés par divers auteurs, y compris l'hydrophone anglais et les « tubes C » des Américains.

Ce travail a été exécuté dans les laboratoires, et avec l'appui de la Direction des Inventions, sous la direction de M. Jean Perrin à qui je suis heureux d'exprimer ici ma profonde reconnaissance.

SOMMAIRE

I

EXPOSÉ GÉNÉRAL	5
A. L'écoute. — B. La sélection. — C. Détermination de la direction	5
Interférences acoustiques dans la mer.	15

II

MICROPHONE I. P. M. POUR L'ÉCOUTE SOUS-MARINE.	17
Description. — Insensibilisation des microphones à la houle et au roulis. — Son propre, résonance, amortissement. — Caractéristiques des micro- phones I. P. M. — Caractères des bruits des navires	17

III

APPAREIL DE MESURES ACOUSTIQUES. — MONTAGE DU COMMANDANT TISSOT.	32
--	----

IV

DIRECTION DU SON DANS L'EAU. — MÉTHODE DE RECHERCHE PAR MAXIMUM. — HYDROPHONE I. P. M.	35
Hydrophone I. P. M., appareil pour l'écoute à bord des bâtiments de surface stoppés. — Étude expérimentale des propriétés directives des cônes droits et des cônes à base oblique. — Seuil de la sensation auditive. Commuta- teur à quatre contacts des boîtes de réception I. P. M.	55

V

DIRECTION DU SON DANS L'EAU. — MÉTHODE DE RECHERCHE PAR MAXIMUM.	49
RÉSEAU DE CAPSULES J. PERRIN.	49
Rapport de M. J. PERRIN à la C. E. P. A. E. S. M. — Études préliminaires à la construction des réseaux de capsules.	50

VI

DIRECTION DU SON DANS L'EAU. — MÉTHODE DE L'ÉCOUTE BINAURICULAIRE. — HYDROGÉOPHONES S. P. M.	60
Généralités sur l'écoute binauriculaire. — Géophones S. P. pour la guerre de mines. — Hydrogéophones S. P. M. pour la guerre sous-marine. — Recherche de la direction avec deux prises de son fixe.	60

VII

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE SUR LA PROPAGATION DU SON DANS LA MER.	67
A. Interférences acoustiques. — Description des expériences, courbes. — Examen des courbes. — Influence du phénomène interférentiel sur l'écoute sous-marine. — Appréciations des distances.	67
B. Fluctuations de la température dans la mer. — Mirages acoustiques. . . .	85

VIII

CONCLUSIONS.	90
----------------------	----

PREMIÈRE THÈSE

PROPAGATION ET RÉCEPTION

DES SONS DANS L'EAU

I. — EXPOSÉ GÉNÉRAL

L'écoute sous-marine comprend la résolution de trois problèmes :

- A. L'écoute proprement dite.
- B. La sélection : séparation des bruits parasites et des bruits des navires.
- C. La détermination de la direction de l'origine d'un bruit.

Nous allons étudier successivement ces trois problèmes et décrire les divers appareils réalisés.

A. — L'Écoute.

Les appareils élémentaires de prise de son peuvent être classés en deux catégories :

- 1° Les appareils microphoniques.
- 2° Les appareils à écoute directe.

1° APPAREILS MICROPHONIQUES. — Ils se composent en principe (fig. 1) d'un microphone convenablement adapté, immergé, et communiquant par un conducteur à enveloppe étanche avec un téléphone et ses accessoires, placés à terre ou à bord d'un navire.

Les appareils A. S. F. et A. S. R. du commandant Tissot furent les premières bonnes réalisations de dispositifs microphoniques (1915).

Les microphones I. P. M. furent construits plus tard ; ils sont pourvus d'un dispositif original qui les insensibilise complètement aux variations

de la pression hydrostatique résultant de la houle et du roulis; ils sont, en outre, particulièrement étudiés au point de vue de l'amortissement de leur son propre.

2° APPAREILS A ÉCOUTE DIRECTE. — Ils sont caractérisés par l'absence de tout circuit électrique; ces appareils furent souvent et improprement désignés sous le nom de « stéthoscopes ». Ils se composent en principe d'une sorte de *capsule manométrique* immergée, mise en communication avec l'oreille de l'observateur par l'intermédiaire d'un long tube acoustique.

Les stéthoscopes Broca (fig. 2) dont les capsules manométriques sont constituées par de petites cellules anéroïdes de baromètre, furent de beaucoup les premiers en date parmi les appareils de ce genre; les stéthoscopes Broca furent montés en 1915 à bord de quelques bâtiments de l'armée navale.

Les stéthoscopes de MM. Villard et Abraham, peu différents en principe des précédents donnèrent de très bons résultats pour l'écoute binauriculaire à bord des sous-marins en plongée (fin 1915), résultats égalés ultérieurement par l'application des hydrogéophones S. P. M. (Mai 1917).

Les hydrogéophones S. P. M. dérivent presque sans transformation des géophones S. P., appareils d'écoute souterraine utilisés pour la guerre de mines; on les applique simplement par l'intérieur contre les tôles des sous-marins, en des points convenablement choisis; ils sont d'un encombrement très réduit et d'un prix de revient minime; leur installation à bord n'exige pas comme celle des stéthoscopes la perforation de la coque; en outre, le son propre des géophones étant amorti, il en résulte une grande netteté de l'audition. Pour ces diverses raisons, l'emploi des hydrogéophones S. P. M. fut rendu réglementaire à bord de tous les sous-marins français par D. M. en date du 18 Septembre 1917. Ces appareils étaient encore en service à la fin de la guerre.

Les « tubes C » des Américains (fig. 3) sont des appareils à écoute directe qui furent utilisés par nos alliés à partir du mois d'Octobre 1917; groupés par deux, ils servaient à la recherche de la direction par la méthode de l'écoute binauriculaire.

Les « tubes C », sensiblement équivalents au point de vue de la portée de l'écoute aux stéthoscopes précédemment cités, se distinguent de ces derniers par la substitution aux capsules manométriques métalliques, de simples tronçons de tubes de caoutchouc de 15 centimètres de longueur et de 30 et 40 millimètres de diamètres intérieur et extérieur, fermés à l'une de leurs extrémités, et emmanchés par l'autre sur des tubes acoustiques métalliques.

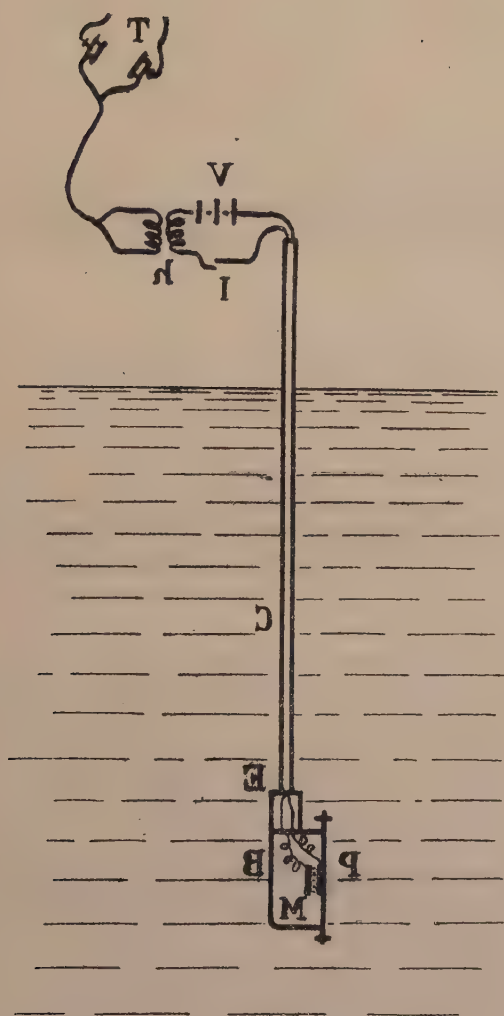


Fig. 1. — Microphone pour l'écoute sous-marine.

P. Plaque vibrante. — B. Boîte étanche. — M. Microphone. — E. Presse-étoupe.
C. Câble étanche. — V. Batterie de piles. — I. Interrupteur. — T. Téléphones.

Les divers appareils cités permirent de reconnaître que les bruits des sous-marins et des embarcations à vapeur sont des bruits rythmés dont la fréquence coïncide avec celle de la rotation des hélices; ils permirent de déceler ces bruits à des distances atteignant et même dépassant *parfois* trois kilomètres en Méditerranée; *souvent* supérieures à 3 kilomètres dans la Manche où la mer, brassée par les marées, a sensiblement même température à toutes profondeurs et constitue un milieu homogène, favorable à la propagation du son.

Ce premier pas franchi, les physiciens se heurtèrent à des difficultés considérables; ils reconnurent que des bruits parasites d'origines diverses troublent l'écoute: bruits à bord du bâtiment écouteur, clapotis de la mer, vent frisant la crête des lames, etc., et que, par mauvais temps, il est aussi difficile de distinguer le bruit d'une hélice dans le concert des bruits parasites que de distinguer la voix d'une personne dans le murmure d'une foule; l'écoute devient alors impraticable.

B. — La Sélection.

Pour éliminer, du moins partiellement, les bruits parasites, on pensa à utiliser le phénomène de la résonance en réalisant des appareils d'écoute *accordés* sur une fréquence musicale caractéristique du bruit écouté; les résultats furent médiocres, et cela s'explique :

Il s'en faut de beaucoup que le bruit d'un navire soit un son musical pur; c'est au contraire un ensemble de bruits et de sons plus ou moins amortis de fréquences diverses, avec parfois prédominance d'une fréquence musicale caractéristique, variable bien entendu d'un bâtiment à un autre, et sur laquelle il peut y avoir intérêt à accorder l'appareil d'écoute; en outre, les bruits parasites très complexes, comprennent souvent des sons dont les fréquences sont voisines de celles des bruits de navires.

M. Broca construisit un sélecteur à résonance électrique, basé sur l'emploi des tubes à vide des amplificateurs de télégraphie sans fil; ce sélecteur permit dans certains cas de parer notablement à la diminution de portée des microphones par mauvais temps; malheureusement il comportait nécessairement un réglage, nécessitait l'entretien des batteries de petits accumulateurs fragiles; assez délicat il ne pouvait être mis qu'entre les mains d'habiles spécialistes.

La résonance n'est pas seule susceptible d'application à l'élimination partielle des bruits parasites. Les appareils d'écoute dirigés par maximum, du genre cornet acoustique par exemple, qui ne perçoivent fortement que les bruits dont l'origine se trouve comprise dans leur angle de sensibilité (une vingtaine de degrés) permettent la recherche de la direc-

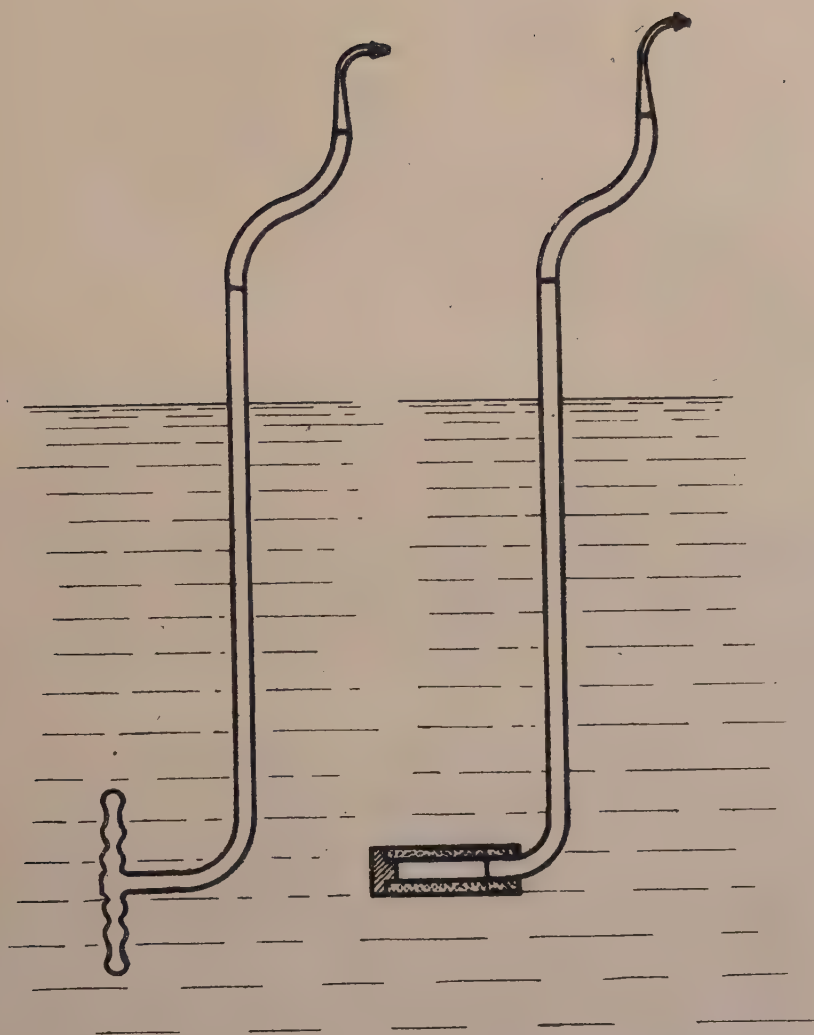


Fig. 2. — Capsule Broca.

Fig. 3. — Tubes « C » des Américains.

tion et du même coup atténuent les bruits parasites dont l'origine est extérieure à leur angle de sensibilité; ils atténuent en particulier les bruits de surface lorsqu'ils sont pointés horizontalement.

C. — La Détermination de la Direction.

Les appareils de direction peuvent être classés en trois catégories :

- 1° Les appareils microphoniques à maximum.
- 2° Les appareils à écoute directe et à maximum.
- 3° Les appareils à écoute directe binauriculaire.

1° APPAREILS MICROPHONIQUES A MAXIMUM. — *L'hydrophone I. P. M.*, dont nous avons déjà parlé, permet l'écoute dirigée à bord des petits bâtiments de surface stoppés. Il se compose essentiellement (fig. 4) d'un cône en feuille de plomb de 4 mm. d'épaisseur, solidement armaturé, mesurant 400 mm. de longueur et 25 degrés d'angle. Il porte à sa partie arrière une boîte microphonique avec plaque vibrante en laiton de 1 mm. d'épaisseur et 90 mm. de diamètre efficace. Suspendu horizontalement dans l'eau à 5 mètres de profondeur, le cône est orientable. L'appareil à bord d'un bâtiment stoppé, permet par temps médiocre (fort clapotis) de déceler à 1 500 mètres la présence d'un sous-marin en marche, et de déterminer sa direction avec une précision de 20°.

Les hydrophones I. P. M. étaient encore en service au mois de juin 1918 lorsque je quittai le laboratoire de Toulon; ils étaient alors sérieusement concurrencés par les « tubes C » des Américains; l'un et l'autre appareil avaient leurs partisans. De l'avis formulé par M. le Commandant Barthélemy directeur de l'école d'écoute de Toulon, l'appareil américain, plus simple et plus maniable que l'appareil français, lui était inférieur au point de vue de la portée dès qu'il faisait mauvais temps.

L'hydrophone Anglais est également un appareil microphonique à maximum qui s'emploie dans les mêmes conditions que l'hydrophone I. P. M. Présenté par le centre des inventions aux Commissions de la Marine en même temps que l'hydrophone I. P. M., il fut jugé équivalent à ce dernier.

L'hydrophone anglais se compose (fig. 5) d'une plaque vibrante de 150 mm. de diamètre environ, dont les deux faces sont immergées. La plaque sertie dans un anneau de bronze de grande inertie, porte en son centre un microphone renfermé dans une petite boîte étanche.

La plaque vibre lorsque son plan et celui de l'onde sonore sont parallèles entre eux; elle ne vibre pas, au contraire, lorsque ces deux plans sont normaux l'un à l'autre. Cette propriété est utilisée pour rechercher l'origine d'un bruit, en faisant pivoter la plaque vibrante autour d'un axe vertical passant par son centre.

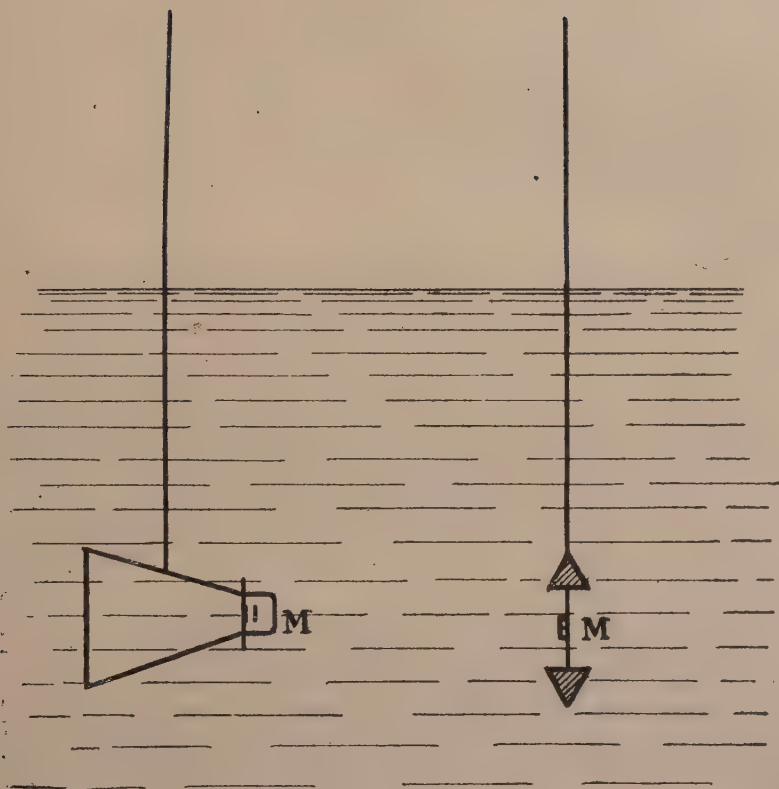


Fig. 4. — Cône I. P. M.

Fig. 5. — Hydrophone Anglais.

2° APPAREILS A ÉCOUTE DIRECTE ET A MAXIMUM. — *Dioptres sphériques.* — M. J. Perrin au début de 1916, avait pensé à utiliser l'image acoustique qui se forme dans l'air, pour un son propagé dans l'eau, au foyer d'un dioptre sphérique matérialisé par une calotte sphérique en tôle limitant la surface de séparation de l'air et de l'eau. Il fit des expériences avec une enveloppe de mine Bréguet, sphère de 750 mm. de diamètre, construite en tôle de 5 mm., et se rendit compte de la nécessité d'employer des appareils de dimensions plus considérables.

Ne disposant pas à l'époque où ces essais eurent lieu de moyens matériels suffisants pour les poursuivre, certain d'autre part de pouvoir réaliser rapidement un appareil léger pouvant s'adapter instantanément à bord de tous les petits bâtiments spécialement destinés à chasser les sous-marins (le besoin d'un tel appareil était le plus urgent en 1916). M. Perrin orienta ses recherches dans cette nouvelle direction.

M. le Lieutenant de Vaisseau Walser reprit l'idée du dioptre sphérique en décembre 1916; c'est au Centre des Inventions qu'il trouva d'abord appui, tant au point de vue de l'aide matérielle que de la collaboration des physiciens; il utilisa pour ses premières expériences la sphère même qui avait servi à M. J. Perrin. Dès qu'il eut obtenu expérimentalement des indications favorables, il sollicita et obtint le concours des services des constructions navales pour sertir deux calottes sphériques dans les tôles d'une coque de chalutier.

Ce qui fut l'idée vraiment originale et particulièrement heureuse de M. Walser, c'est d'avoir réparti sur les dioptres sphériques un grand nombre de capsules d'écoute débouchant librement à l'intérieur de la sphère. M. Walser pensait très justement que les plaques vibrantes des capsules, éléments plans de faible épaisseur, vibreraient bien mieux sous l'impulsion des ondes transmises dans l'eau, que les éléments sphériques de tôle épaisse de la sphère ordinaire : il en fut bien ainsi.

Les calottes sphériques Walser, éléments d'une sphère de plusieurs mètres de diamètre, mesurent environ 1 mètre de diamètre de base, et font partie intégrante de la coque ayant été substituées à des tôles de dimensions égales. Deux calottes sont montées symétriquement par rapport à l'axe du navire, aussi bas que possible en-dessous de la ligne de flottaison, et à l'avant (fig. 6). Les images acoustiques se forment à l'intérieur de la coque dans une chambre spéciale soigneusement isolée des bruits extérieurs par des revêtements de feutre. En raison de la grandeur des longueurs d'ondes acoustiques dans l'air et plus encore dans l'eau, les images formées au foyer du dioptre ne sont pas des points, mais des taches de diffraction où l'intensité sonore est relativement considérable. Bien plus que d'écouter à l'oreille nue, il est avantageux d'explorer le plan focal du dioptre à l'aide d'un cornet acoustique dont la circonférence de base soit susceptible d'embrasser totalement la tache

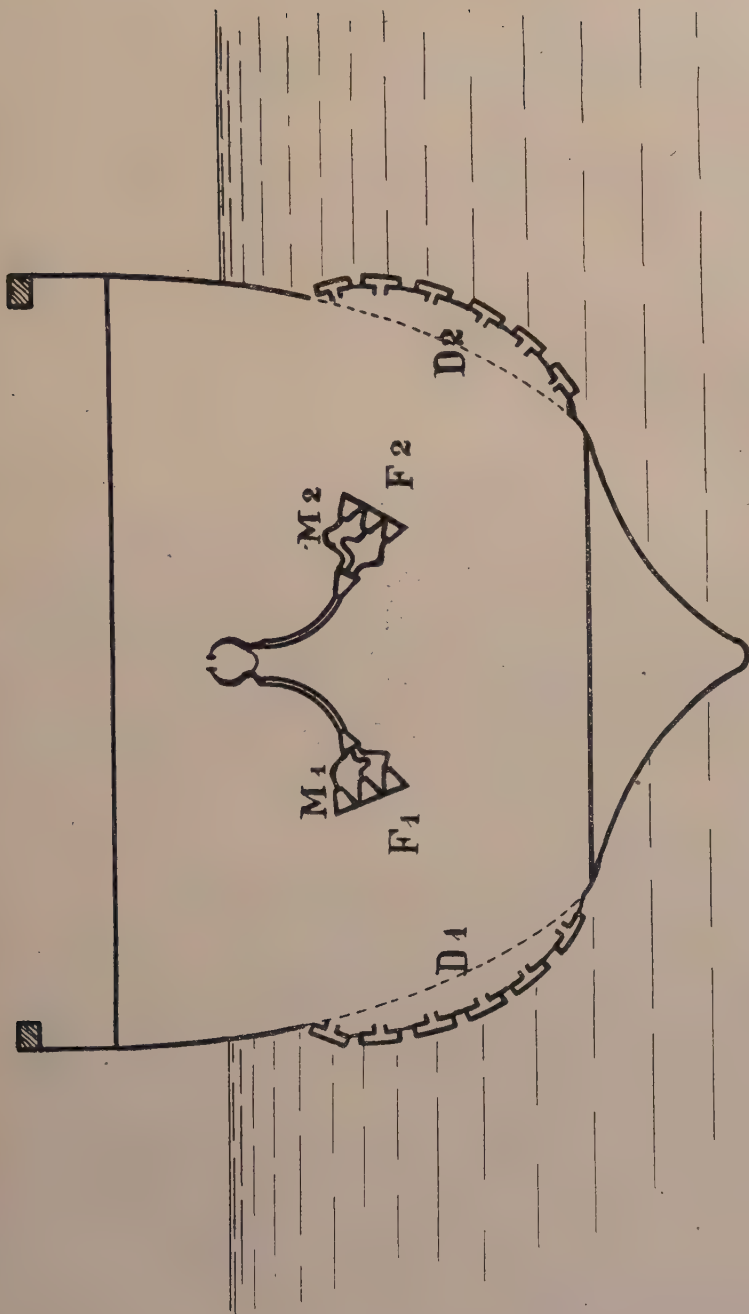


Fig. 6. — Appareil WALSER (coupe verticale).
 D_1, D_2 , Dioptrés. — F_1, F_2 , Foyers. — M_1, M_2 , Myriaphones.

de diffraction: un myriaphone Perrin est employé à cet usage, jouant le même rôle qu'un oculaire explorant le plan focal d'un objectif de lunette astronomique. La position des images acoustiques par rapport à l'axe du dioptré détermine la direction de l'origine des bruits transmis dans la mer.

Dès les premiers essais, l'appareil Walser permit d'écouter à bord des bâtiments de surface en marche lente (5 nœuds), ce qui constituait sur le passé un progrès considérable. Malheureusement l'appareil Walser ne peut être installé de façon vraiment utile que sur les bâtiments dont le tirant d'eau est égal ou supérieur à 5 m. 50, cela en raison des phénomènes interférentiels dont il sera question plus loin.

Il n'y eut jamais lieu d'opposer l'un à l'autre l'appareil Walser et l'hydrophone I. P. M. Les deux appareils répondent à des besoins différents.

L'appareil Walser ne peut être installé utilement, nous l'avons déjà signalé, qu'à bord des bâtiments calant plus de 5 m. 50; il eût été dangereux pour ces bâtiments très vulnérables à la torpille, de pratiquer l'écoute stoppée avec des hydrophones I. P. M., dans le voisinage d'un sous-marin. Au contraire, *le stoppage des petits bâtiments (vedettes et torpilleurs), mobiles et calant peu, était possible sans danger*; les appareils Walser leur étant d'autre part inapplicables, les petits bâtiments pratiquèrent jusqu'à la fin de la guerre la méthode de chasse par écoutes stoppées et bonds successifs.

Réseaux plans de capsules de M. J. Perrin. — Congus sur le même principe que les myriaphones Perrin pour l'écoute des avions, ils étaient destinés à l'écoute en marche à bord des cargos.

L'étude de ces appareils ne fut pas achevée; un réseau plan fut monté sur caisson ou fausse coque: il se composait de 49 capsules d'écoute directe réparties en 7 files verticales de 7 capsules sur une surface rectangulaire de 5 mètres et 1 m. 50 de côté, et réunies à l'oreille de l'observateur par des *tubes de longueurs égales*.

L'observateur percevait en phase le son des ondes dont le plan, parallèle à celui des capsules, atteignait *simultanément* les 7 files verticales. Grâce à l'emploi d'un commutateur à tubes coulissants, il pouvait percevoir en phase également le son d'une onde oblique atteignant *successivement* les 7 files verticales. L'arrivée du son en phase correspondant au maximum d'intensité de la perception, le jeu du commutateur déterminait la direction de la source sonore.

L'essai statique du réseau et du commutateur en mai 1918 permit de vérifier l'exactitude du principe de l'appareil.

3° APPAREILS A ÉCOUTE DIRECTE BINAURICULAIRE. — Le principe de l'écoute binauriculaire est le suivant: deux appareils d'écoute sont immergés à une même profondeur; distants l'un de l'autre de 1 mètre

environ, ils communiquent l'un avec l'oreille droite, l'autre avec l'oreille gauche d'un observateur qui perçoit une impression « de droite » ou « de gauche », suivant que l'onde sonore atteint en premier lieu l'appareil qui communique avec son oreille droite, ou celui qui communique avec son oreille gauche.

MM. Villard et Abraham appliquèrent les premiers (fin de 1915) la méthode binauriculaire à l'écoute à bord des sous-marins en plongée, avec deux « stéthoscopes » extérieurs à la coque.

La même méthode fut appliquée ultérieurement avec des hydrogéophones S. P. M. également à bord des sous-marins en plongée.

Les Américains pratiquèrent l'écoute binauriculaire avec leurs « tubes C », à bord des petits bâtiments de surface stoppés.

Très précis pour la recherche de la direction, les stéthoscopes et tubes C n'atténuent pas les bruits parasites; cette propriété reste le privilège des seuls appareils à maximum (exception faite cependant pour les hydrogéophones S. P. M. appliqués contre les tôles *inférieures* des sous-marins).

Nous avons construit un appareil réunissant les avantages de l'écoute par maximum et de l'écoute binauriculaire; il était constitué par 2 hydrophones I. P. M. jumelés, montés de telle façon que leurs axes fussent parallèles, les microphones de l'un et de l'autre étant reliés respectivement à l'un et à l'autre des 2 téléphones d'un casque unique. Le poids et l'encombrement de cet appareil étaient prohibitifs au point de vue de son emploi pratique; en outre, il est difficile de trouver deux microphones de sensibilité et de timbre identiques.

Interférences dans la mer.

Nous avons vérifié d'une façon certaine que l'immersion profonde des appareils d'écoute est indispensable en raison des phénomènes interférentiels principalement dus à la composition des mouvements vibratoires issus d'une source de son immergée, et de son image par réflexion sur la surface de la mer.

Le phénomène interférentiel acoustique est tout à fait comparable aux phénomènes d'optique physique mis en évidence par des expériences célèbres de Fresnel; la répartition dans la mer des régions où l'intensité du son est maximum ou minimum, obéit à la même loi que la répartition des franges de Fresnel obtenues par interférence des rayons directs et réfléchis issus d'une même source. Et, de même que dans le cas du phénomène optique une frange noire coïncide avec la surface réfléchissante: *un minimum d'intensité sonore coïncide avec la surface de la mer quelle que soit la longueur d'onde considérée*; ce premier minimum est suivi d'une série de maximums et minimums alternés; la distance des deux maximums ou minimums d'intensité consécutifs, et par suite la profon-

deur du premier maximum à partir de la surface, est d'autant plus grande que le point d'observation est éloigné de la source sonore.

On comprend maintenant que la portée de l'appareil Walser monté sur un bâtiment de tirant d'eau égal à 5 m. 50 soit sensiblement inférieure à la portée de l'hydrophone I. P. M. immergé à 5 mètres de profondeur.

M. le Commandant Barthélemy, directeur de l'école d'écoute, eut l'idée, pour utiliser à bord d'un même bâtiment les avantages propres des microphones (plus grande portée) et des appareils Walser (écoute en marche), de préconiser la méthode de chasse consistant : 1° en l'utilisation des microphones I. P. M. mouillés en plombs de sonde pour la surveillance à bord des patrouilleurs stoppés, et 2° l'utilisation des appareils Walser pour la poursuite en marche des sous-marins découverts par les microphones.

II. — MICROPHONE I. P. M. POUR L'ÉCOUTE SOUS-MARINE

DESCRIPTION. MONTAGE. ANCIEN. — Les microphones I. P. M. se composent (fig. 7) : d'une plaque vibrante P, en laiton, de 90 mm. de diamètre efficace et 1 mm. d'épaisseur, réceptrice des ondes propagées dans la mer, fermant sur joint étanche une boîte en fonte B munie d'un presse-étoupe pour le passage du câble; contrairement à ce qui a lieu dans le cas de l'hydrophone anglais (exposé général, direction) une seule des faces de la plaque vibrante est baignée par la mer. Une boîte à grenaille « Solid Back » M, joint microphonique semblable à ceux utilisés sur les appareils téléphoniques ordinaires, prend appui, par l'une de ses électrodes, sur le centre de la plaque vibrante, et, par l'autre électrode, sur une petite barrette K solidaire de la boîte microphonique (montage ancien). Les deux électrodes sont reliées par 2 fils très souples, aux deux conducteurs du câble étanche C, lequel, débouchant du presse-étoupe E et pouvant servir en même temps de suspension, conduit le courant aux appareils récepteurs installés à terre ou sur le pont d'un navire.

Les appareils récepteurs comprennent : 3 piles sèches, un transformateur microphonique et un casque téléphonique de 70 ohms. Le transformateur, comme on le sait, a pour but d'éviter la circulation inutile dans les téléphones du courant permanent qui traverse le microphone.

La boîte à grenaille « Solid Back » employée dans les microphones I. P. M. est du type commercial construit par la Société du matériel téléphonique; elle se compose (fig. 8) de 2 petits disques de charbon C₁ et C₂ solidaires des pièces métalliques A et D; la pièce D forme boîte à grenaille; elle est recouverte intérieurement d'une couche de vernis isolant. Une petite lamelle de mica extrêmement mince L relie entre elles les pièces A C₁ et D C₂. L'intervalle libre compris entre les deux électrodes de charbon est rempli de grenaille de charbon non comprimée.

« Respiration » des microphones. — Les microphones I. P. M., montage ancien, présentaient un grave inconvénient : leur fonctionnement subissait une perturbation du fait de la houle et du roulis faisant varier la pression hydrostatique supportée par la plaque vibrante. La plaque vibrante fléchissant sous l'augmentation de la pression hydrostatique écrasait la boîte à grenaille contre la barrette K, modifiant ainsi ses caractéristiques, les choses revenant à leur état primitif dès que la pression reprenait sa valeur initiale. Il en résultait une variation périodique

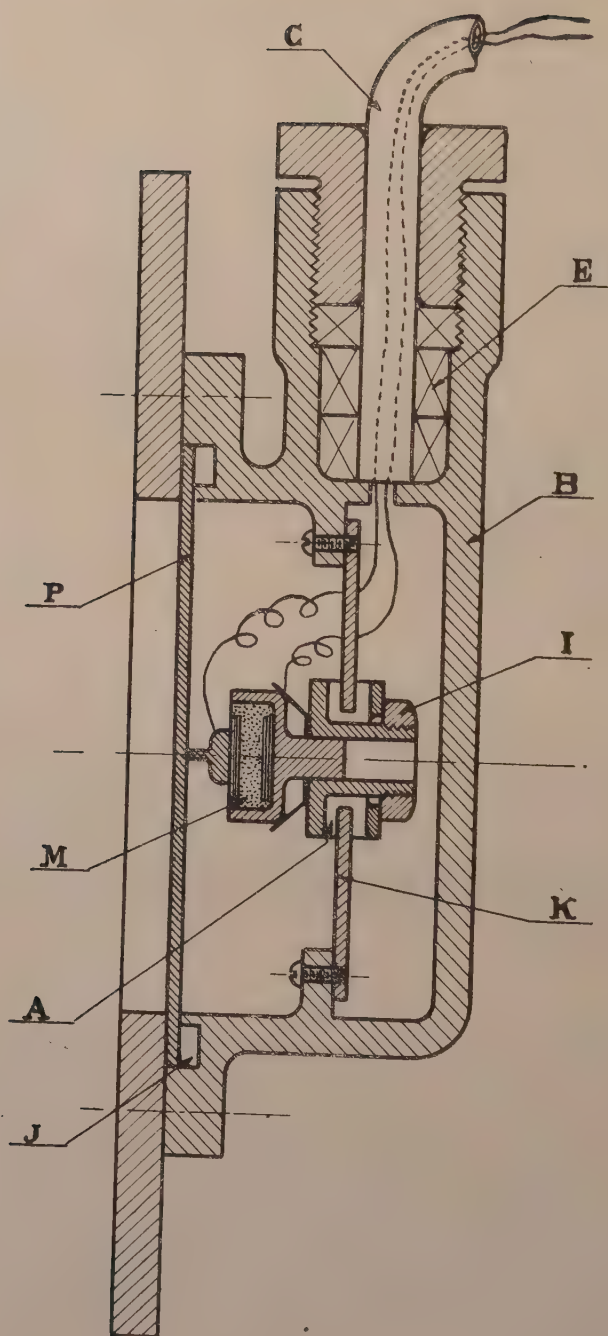


Fig. 7. — Microphone I. P. M.

B. Boîte étanche. — P. Plaque vibrante. — J. Joint caoutchouc. — M. Boîte à grenaille.
 — K. Barrette d'appui. — A. Isolant. — L. Pièce de fixation de l'électrode arrière. — C. Câble.
 — E. Presse-étoupe.

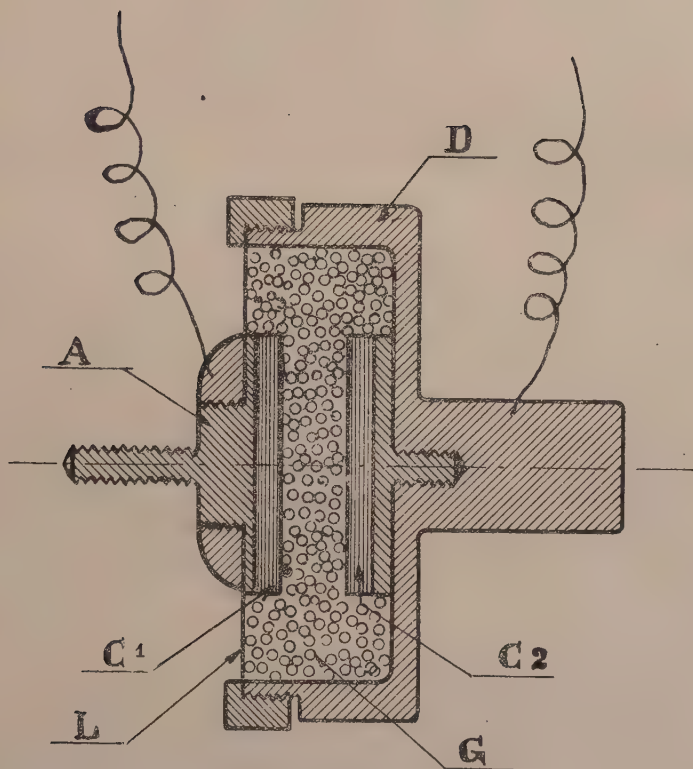


Fig. 8. — Boîte à grenaille « SOLID-BACK ».

- A. Partie métallique, électrode avant.
- D. — — — — — arrière.
- C₁. Charbon électrode avant.
- C₂. — — — — — arrière.
- G. Grenaille de charbon.
- L. Lamelle de mica.

du timbre et de l'intensité du son perçu, variation de même fréquence que la houle et le roulis, donnant aux observateurs l'impression d'entendre « respirer les microphones ».

Cet inconvénient était particulièrement gênant lorsqu'il s'agissait de rechercher la direction d'un navire à l'aide d'un appareil à maximum (cône Perrin); une telle recherche nécessite en effet la fixité du timbre et de la sensibilité du microphone; en fait, les cônes Perrin montés avec le microphone « montage ancien » n'étaient utilisables que par temps calme.

INSSENSIBILISATION DES MICROPHONES A LA HOULE ET AU ROULIS. — Nous nous sommes proposé de rechercher un montage de la boîte à grenaille tel que le microphone fût insensible à la houle et au roulis.

J'ai pu réaliser un montage à inertie sélective satisfaisant complètement à cette condition. *Ce montage permet de doubler le nombre de jours où l'écoute au microphone était pratiquement possible.*

Hautement apprécié par les services de la marine, le nouveau montage fut adopté (15 décembre 1917); les nouveaux microphones furent substitués aux anciens au fur et à mesure des livraisons de l'industrie.

Principe. — Le principe du nouveau montage est le suivant :

1° *Les deux électrodes de la boîte à grenaille sont rendues solidaires du centre de la plaque vibrante, de telle sorte que la plaque fléchissant sous la pression hydrostatique, dont les vibrations ont une longue période, entraîne d'un seul bloc l'une et l'autre électrode, sans qu'il en résulte pour elles de mouvement relatif, et par conséquent sans qu'aucune variation du courant électrique qui traverse le microphone ne se produise : les fluctuations de la pression hydrostatique supportée par la plaque ne sont pas perçues.*

2° *L'inertie de l'électrode arrière de la boîte à grenaille, notablement augmentée, est utilisée pour obtenir, sous l'impulsion des trains d'ondes sonores dont la période est courte, un mouvement relatif des électrodes de la boîte à grenaille, et une variation corrélative du courant qui traverse le microphone : les ondes sonores sont perçues.*

Réalisation. — *L'électrode arrière de la boîte à grenaille prend appui (fig. 9) sur le centre d'une lame flexible R, chargée en son centre de l'inertie de la pièce de fixation I, et fixée par ses extrémités aux deux branches d'un étrier rigide E, lequel est soudé sur le centre de la plaque vibrante. La pièce de fixation I, constituée par un écrou et un boulon, enserre la lame flexible R par l'intermédiaire de deux larges rondelles de caoutchouc, qui, tout en assurant l'isolement électrique de l'électrode arrière de la boîte à grenaille, amortissent les vibrations propres de la lame R.*

La lame flexible R joue un rôle analogue à celui d'un ressort de voiture

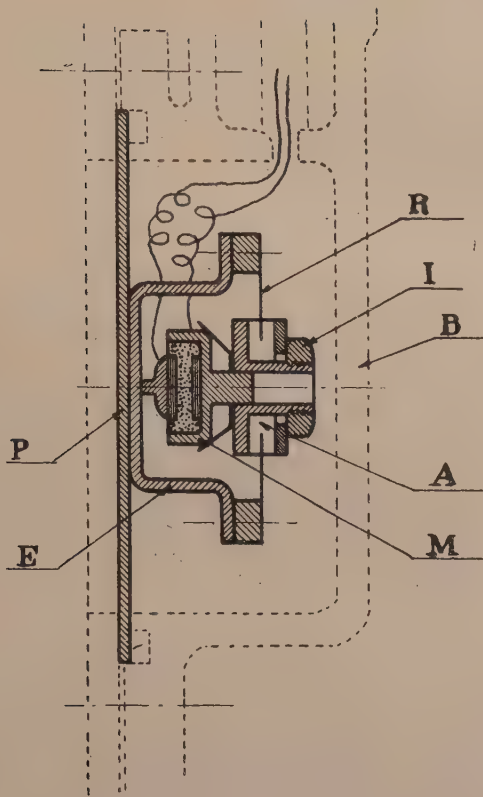


Fig. 9. — Microphone I. P. M. à inertie sélective.

P. Plaque vibrante. — E. Étrier. — R. Lame flexible. — M. Boîte à grenaille. — I. Inertie.
A. Amortisseur caoutchouc. — B. Boîte microphonique.

qui, en permettant le mouvement relatif des essieux et de la carrosserie, grâce à l'inertie de cette dernière, protège les voyageurs contre les chocs que ceux-ci subiraient sans cela par suite du passage des roues sur les petits accidents du terrain (pavés, passages à niveau etc.).

Il est évident que le choix des dimensions du ressort R, de l'inertie totale de l'électrode arrière et de sa pièce de fixation I, et des rondelles de caoutchouc jouant le rôle d'amortisseurs, n'est pas indifférent.

Détail. — Plutôt que de fixer rigidement l'électrode arrière de la boîte à grenaille sur la pièce I, nous avons préféré le dispositif suivant qui présente le double avantage de simplifier le montage et d'éviter la rupture possible de la boîte à grenaille par suite de déformations de l'étrier résultant de chocs violents.

La partie cylindrique de l'électrode arrière, coulisse à frottement doux dans un trou pratiqué au centre de la pièce I. Un très faible ressort en maillechort, prenant appui sur la pièce I, pousse l'ensemble de la boîte à grenaille, assurant ainsi le contact de l'électrode avant avec la plaque vibrante. Une petite boule d'ébonite vissée à l'extrémité de l'électrode avant isole électriquement cette dernière (ce dispositif est représenté sur les figures 7 et 8.)

SON PROPRE. RÉSONANCE. AMORTISSEMENT. — Nous avons étudié l'influence des dimensions des divers éléments des microphones à inertie sur les qualités de l'appareil qu'ils constituent. Particulièrement, nous avons comparé successivement les uns aux autres divers microphones constitués par des boîtes microphoniques identiques, montées avec des plaques vibrantes et des boîtes à grenaille également identiques, mais différant les uns des autres par les dimensions des pièces de montage : ressort R, inertie I et rondelles d'amortissement.

Nous avons constaté :

1° *Que les microphones à inertie ont un son propre, ce qui veut dire que, sous l'impulsion d'un choc, ils entrent en vibration à la manière d'une cloche.*

2° *Qu'ils sont particulièrement sensibles aux vibrations dont la fréquence coïncide avec celle de leur son propre.*

3° *Que la fréquence du son propre d'un microphone à inertie est la même que celle de la vibration de l'ensemble R I. (ressort et inertie). Le son propre peut varier d'un microphone à un autre dans un rapport égal à 1 au 2 octaves.*

4° *Que l'amortissement, par des rondelles de caoutchouc de dimensions convenables, de la vibration de R. I. permet de supprimer le son de cloche et corrélativement d'étaler l'intervalle de sensibilité des microphones tout en supprimant leur sensibilité excessive aux sons de résonance; il en résulte en définitive une plus grande netteté d'audition.*

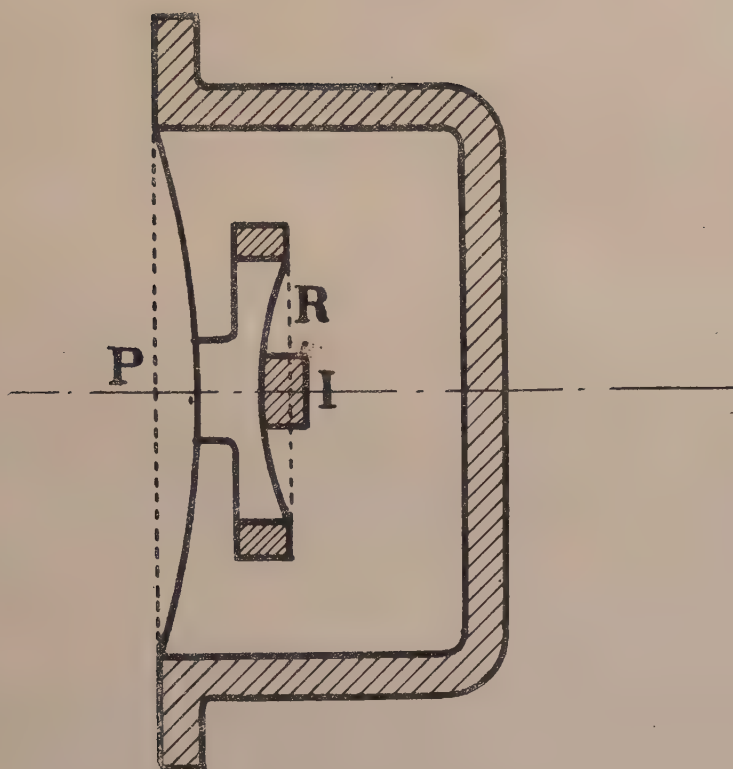


Fig. 10.

P. Plaque vibrante.
R. Lame flexible.
I. Inertie.

Des microphones à inertie, bien que pourvus de lames vibrantes identiques, pouvant avoir des sons propres très différents, sons propres dont les fréquences sont déterminées, nous l'avons dit, par les dimensions des pièces de montage R et I, il faut en conclure que : *la plaque réceptrice P est sensible d'une façon continue dans un intervalle musical égal à plusieurs octaves, qu'elle travaille en régime de vibration forcée, et que la lame flexible R chargée en son centre de l'inertie I joue un rôle de sélection.*

Sur cette conclusion, l'étude théorique du fonctionnement du microphone à inertie peut être abordée assez simplement : elle se réduit à l'étude du mouvement relatif de la pièce I et de la plaque vibrante P lorsque celle-ci entre en vibration forcée sous l'impulsion des trains d'ondes transmis dans la mer. Nous supposons que les trains d'ondes sont peu amortis, ce qui est vrai dans le cas des bruits aigus des sous-marins. Les déplacements de la plaque P sont alors de la forme :

$$A \sin \omega t.$$

Toute déformation du ressort R d'amplitude dy donne naissance à une force élastique de la forme :

$$F = C \cdot dy$$

C désignant une constante.

Les coordonnées absolues de l'inertie I sont au temps t (fig. 10).

$$(1) \quad x = A \sin \omega t - dy$$

l'équation d'équilibre de l'inertie I s'écrit :

$$(2) \quad I \frac{d^2x}{dt^2} = Cdy - f \frac{dx}{dt}$$

f désignant un coefficient d'amortissement dépendant principalement des dimensions des rondelles de caoutchouc.

En tirant la valeur de y de (1) et remplaçant dans (2) il vient :

$$I \frac{d^2x}{dt^2} = C (A \sin \omega t - x) - f \frac{dx}{dt}$$

qui s'écrit :

$$(3) \quad I \frac{d^2x}{dt^2} + f \frac{dx}{dt} + Cx = AC \sin \omega t.$$

L'intégrale générale de l'équation (3) se compose de deux parties; l'une est l'intégrale de l'équation sans second membre, elle fournit un mouvement oscillatoire de période

$$T' = 2\pi \sqrt{\frac{I}{C - \frac{f^2}{4I}}}$$

amorti, soit périodique, soit apériodique suivant la grandeur du paramètre f . La période T' diffère généralement fort peu de la période

$$(4) \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{C}}.$$

C'est la période propre de vibration de l'inertie I .

A cette intégrale générale, il faut ajouter une intégrale particulière, qui définit précisément les coordonnées absolues de l'inertie I . Cette intégrale est de forme :

$$(5) \quad x = x_0 \sin(\omega t - \varphi)$$

où φ et x_0 sont donnés par les relations

$$(6) \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{f\omega}{C - \omega^2 I}$$

$$(7) \quad x_0 = \frac{AC \sin \varphi}{f\omega}.$$

En régime permanent, c'est-à-dire après un temps suffisant pour que l'intégrale de l'équation (5) privée de son second membre disparaisse, l'inertie I est animée d'un mouvement vibratoire d'amplitude constante x_0 dont la période est celle même de la vibration excitatrice $A \sin \omega t$. Son amplitude est fonction des facteurs et des coefficients A , C , I , f , ω ; il existe généralement un certain décalage φ entre la vibration de l'inertie I et la vibration de la plaque P .

1° *Proposons-nous en premier lieu d'étudier les variations de l'amplitude x_0 .*

On trouve facilement en partant des équations (6) et (7),

$$(8) \quad x_0 = \frac{A \cdot C}{\sqrt{(C - \omega^2 I)^2 + f^2 \omega^2}}.$$

Cette fraction est maximum lorsque son dénominateur est minimum; on vérifie que la période correspondante est

$$T' = 2\pi \sqrt{\frac{I}{C - \frac{f^2}{2I}}}$$

qui diffère peu de la période propre T de la vibration de l'inertie I (relation 4).

L'amplitude maximum de la vibration de I correspond donc à l'égalité de la période de vibration excitatrice et de la période propre de la vibration de I .

T s'appelle son de plus forte résonance

Nous posons

$$\Omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{et} \quad n = \frac{1}{T}.$$

L'amplitude de plus forte résonance se calcule à partir de l'équation (8), désignons-la par B, on a :

$$(9) \quad B = \frac{A.C}{f.2\pi n}.$$

L'amplitude de plus forte résonance peut être extrêmement grande si l'amortissement est faible.

On sait que la courbe représentant la variation de x_0 en fonction de n est une courbe en forme de cloche, dont le sommet correspond à l'égalité : $\omega = \Omega$.

Il est commode, pour se faire une idée de la loi de sa variation, d'exprimer l'amplitude x_0 en fonction de l'amplitude de plus forte résonance B, et de l'écart $\varepsilon = n - p$ de la fréquence de résonance n , et de la fréquence considérée p . Il vient en tenant compte des relations (4), (8) et (9)

$$x_0 = \frac{B}{\sqrt{\frac{4\pi^2 I (n+p)(n-p)}{2\pi n f} + \frac{p^2}{n^2}}}$$

Relation qui devient si l'on suppose p et n assez peu différents pour qu'on puisse écrire $\frac{p^2}{n^2} = 1$ et $n + p = 2n$

$$x_0 = \frac{B}{\sqrt{16\pi^2 I^2 \left(\frac{\varepsilon}{f}\right)^2 + 1}}$$

qui peut s'écrire en posant $16\pi^2 I^2 = K$

$$(10) \quad \frac{x_0}{B} = \frac{1}{\sqrt{K \left(\frac{\varepsilon}{f}\right)^2 + 1}}$$

Sous cette forme simple on voit que des valeurs égales du rapport $\frac{x_0}{B}$ correspondent à des valeurs égales du rapport $\frac{\varepsilon}{f}$.

Pour fixer les idées, considérons la courbe construite pour une certaine valeur f_1 du coefficient d'amortissement (courbe en trait plein de la figure 11) et les points A et A' d'ordonnée x_1 tel que le rapport $\frac{x_1}{B_1}$ soit par exemple égal à $\frac{1}{2}$.

Supposons qu'en augmentant les dimensions des rondelles de caoutchouc des amortisseurs, nous venions à doubler la valeur de f_1 . La relation (9) montre qu'alors l'ordonnée maximum B_2 de la courbe correspondant à la nouvelle valeur f_2 du coefficient d'amortissement sera égale à la moitié de l'ordonnée maximum B_1 de la courbe précédente.

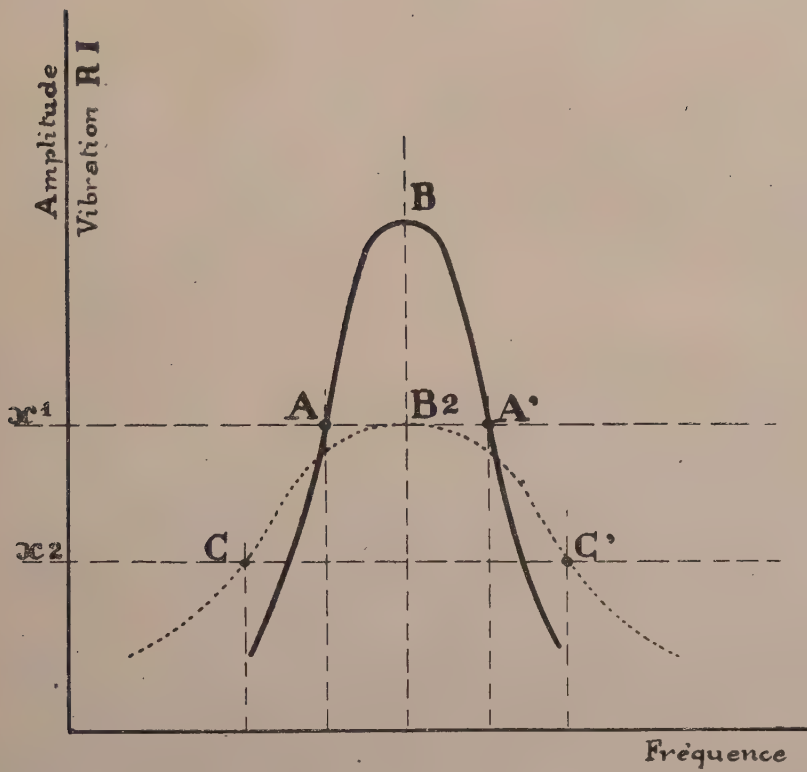


Fig. 41.

La relation (10) montre que sur la nouvelle courbe (courbe en pointillé de la figure 11) l'écart des fréquences correspondant aux points C et C' d'ordonnée x_2 tels que $\frac{x_2}{B_2} = \frac{1}{2}$ est double de l'écart des fréquences correspondant aux points A et A'.

En définitive, le fait de doubler le coefficient d'amortissement a réduit au quart de sa valeur primitive le rapport de l'ordonnée maximum à l'intervalle de résonance, cet intervalle étant défini par la condition que ses fréquences extrêmes correspondent à une valeur x_0 de l'amplitude égale à la moitié de l'amplitude de résonance B'.

2° *Le mouvement relatif de la plaque P et de l'inertie I dépend non seulement de l'amplitude des vibrations de P et de I, mais aussi de la différence de phase qui existe entre elles.*

Proposons-nous donc d'étudier la loi de variation de φ en fonction de la fréquence d'impulsion.

On tire de la relation (6)

$$(11) \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{I} \frac{f\omega}{\Omega^2 - \omega^2}.$$

a) Lorsque $\omega = \Omega$ (cas de la résonance)

$$\operatorname{tg} \varphi = \infty \quad \text{donc} \quad \varphi = \frac{\pi}{2}.$$

b) Lorsque $\Omega > \omega$, c'est-à-dire lorsque la fréquence excitatrice est plus petite que la fréquence de la vibration propre de RI

$$\operatorname{tg} \varphi > 0 \quad \varphi < \frac{\pi}{2}.$$

c) Lorsque $\Omega < \omega$, c'est-à-dire lorsque la fréquence excitatrice est plus grande que la vibration propre de RI

$$\operatorname{tg} \varphi < 0 \quad \varphi > \frac{\pi}{2}.$$

3° *Connaissant les lois de variation de A et de φ en fonction de la fréquence excitatrice n, il est possible de se rendre compte de la loi des variations du mouvement relatif de P et de I en fonction de cette même fréquence.*

Supposons que, gardant une amplitude constante A, la fréquence excitatrice, d'abord très faible (sons graves) croisse, devienne de plus en plus grande, atteigne, puis dépasse la fréquence de résonance, et finalement devienne très grande (sons aigus).

Étudions et représentons (fig. 12) les variations corrélatives de l'amplitude du mouvement relatif de P et de I.

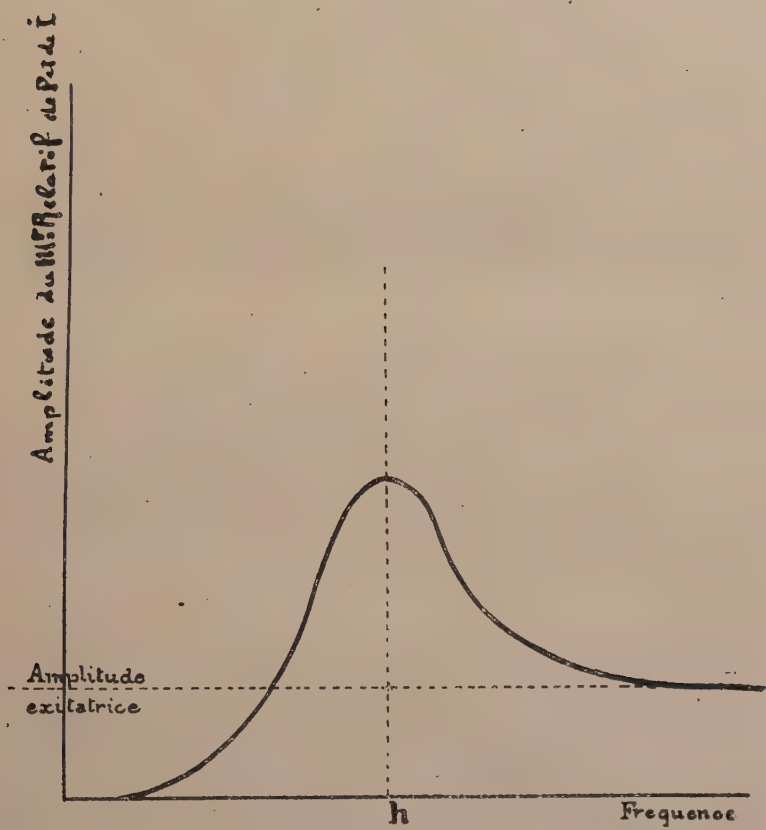


Fig. 12.

a) Lorsque la fréquence excitatrice est faible

$$\begin{aligned}\varphi &= 0 && \text{(relation 11)} \\ x_0 &= A && \text{(relation 8)}.\end{aligned}$$

L'amplitude du mouvement relatif de P et I est nulle.

Les deux électrodes du microphone se déplacent d'un seul bloc sans mouvement relatif, et par conséquent les sons graves et les fluctuations périodiques de la pression hydrostatique dues à la houle et au roulis n'impressionnent pas le microphone.

b) Lorsque la fréquence excitatrice augmente et se rapproche de la fréquence de résonance

φ croît et se rapproche de $\frac{\pi}{2}$

x_0 croît et se rapproche de l'amplitude de résonance B.

B est généralement beaucoup plus grand que A; il en résulte que l'amplitude du mouvement relatif des électrodes du microphone est très grande pour les sons dont la fréquence est voisine de la fréquence de résonance, et que la perception de ces sons est très intense. L'intervalle de résonance est d'autant plus large, et l'intensité de résonance d'autant moins grande que l'amortissement est plus grand.

c) Lorsque la fréquence excitatrice continue à croître

φ tend vers π

et

x_0 tend vers 0.

L'amplitude du mouvement relatif se rapproche de plus en plus de l'amplitude de la vibration excitatrice; la résonance n'intervient plus, le microphone est alors très fidèle.

En résumé :

Un microphone à inertie perçoit avec renforcement les vibrations dont la fréquence diffère peu ou pas du tout de celle de sa vibration propre; il ne perçoit pas les vibrations de fréquence nettement inférieure, et perçoit sans renforcement les vibrations de fréquence nettement supérieure. Ces conclusions sont absolument conformes aux résultats de l'expérience.

Les considérations qui précèdent semblent devoir être fréquemment applicables dans d'autres cas de réception de vibrations: particulièrement dans le cas des géophones S. P. destinés à la perception des bruits souterrains.

CARACTÉRISTIQUES DES MICROPHONES I. P. M. — Les caractéristiques des diverses pièces constituant le montage nouveau ont été arrêtées définitivement à la suite d'une série de comparaisons instantanées, méthodiques. Elles ont été choisies de telle sorte que le son propre de l'appareil fût compris dans le 4^e octave, répondant ainsi dans la majorité des cas aux besoins pratiques.

Les microphones I. P. M., grâce à *l'amortissement de leur son propre*, permettent de compter facilement les nombres de tours des hélices, dont le rythme est fréquemment scandé par des chocs graves. Ils sont sensibles particulièrement aux « sifflements » aigus des hélices, perceptibles aux plus grandes distances.

CARACTÈRES DES BRUITS DES NAVIRES. — Nous avons eu souvent l'occasion d'écouter, à bord de la goélette *Manénil* du centre des inventions, mouillée en rade de Toulon, les bruits de navires qui circulaient dans nos parages. Plusieurs microphones étant immergés simultanément à la même profondeur, un commutateur nous permettait de passer instantanément d'un appareil à un autre, sans interrompre l'écoute et de faire ainsi des comparaisons méthodiques.

Nous avons observé que les bruits des navires comprennent, outre des bruits proprement dits, des sons plus ou moins amortis de fréquences très diverses.

Nous avons vérifié que les microphones perçoivent le mieux les sons dont la fréquence se rapproche le plus de celle de leur son propre.

Le pilonnement d'une machine produit des sons graves qui sont perçus par un premier microphone dont le son propre est grave et sont presque ignorés par un second microphone dont le son propre est aigu. Ce dernier, par contre, perçoit des bruits aigus émis probablement par l'hélice elle-même, bruits aigus ignorés par le microphone dont le son propre est grave.

Nous avons constaté que les bruits graves, particulièrement avantageux pour compter le nombre de tours des hélices, et par suite caractériser les bruits des navires, ne se propagent jamais loin. Ils sont toujours imperceptibles à quelques centaines de mètres de la source qui les émet.

Les bruits aigus sont au contraire souvent perceptibles à de grandes distances (plusieurs milliers de mètres) bien que masqués à proximité de la source, par l'intensité des bruits graves émis simultanément.

Ces observations sur la propagation des sons graves et aigus trouvent une explication dans les phénomènes interférentiels décrits à la fin de ce mémoire.

III. — APPAREIL DE MESURES ACOUSTIQUES MONTAGE DU COMMANDANT TISSOT

Nous décrivons le montage Tissot immédiatement après le microphone, en raison de ses applications comme appareil de mesures, aux études exposées dans les chapitres suivants :

Étude systématique de la direction dans l'eau (chapitre IV).

Étude des phénomènes d'interférences acoustiques dans l'eau (Chapitre VII).

Le Commandant Tissot s'était proposé de substituer à la *méthode auditive* de détection des sous-marins une *méthode dite objective* basée sur la substitution d'un galvanomètre à cadran et aiguille, aux téléphones d'un appareil microphonique.

DESCRIPTION. — Le montage Tissot comprend (fig. 15).

1° Un microphone I. P. M. et ses accessoires : trois piles, un commutateur à quatre contacts permettant de couper le circuit du microphone ou d'y intercaler 1, 2, ou 3 piles, et un transformateur microphonique.

2° Un amplificateur à trois étages n° 2 de la télégraphie militaire, qui amplifie le courant pris aux bornes du secondaire du transformateur microphonique.

3° Un détecteur de T. S. F. à galène, qui redresse le courant amplifié.

4° Un galvanomètre et son shunt réglable qui mesure le courant amplifié et redressé.

VALEUR DE LA MÉTHODE. — Le galvanomètre ne fournit aucune indication sur la *valeur absolue* de l'intensité du son ; il donne des indications précieuses sur le *rapport des intensités du son d'une même source, perçues dans des conditions différentes*, par exemple :

Perception du son pour diverses orientations d'un appareil de direction à maximum (chapitre IV).

Perception du son à des distances différentes de la source, et pour des immersions différentes du microphone (chapitre VII).

Au point de vue de l'application à la détection des sous-marins, le montage Tissot ne fut pas pratiquement utilisable ; certes, par temps

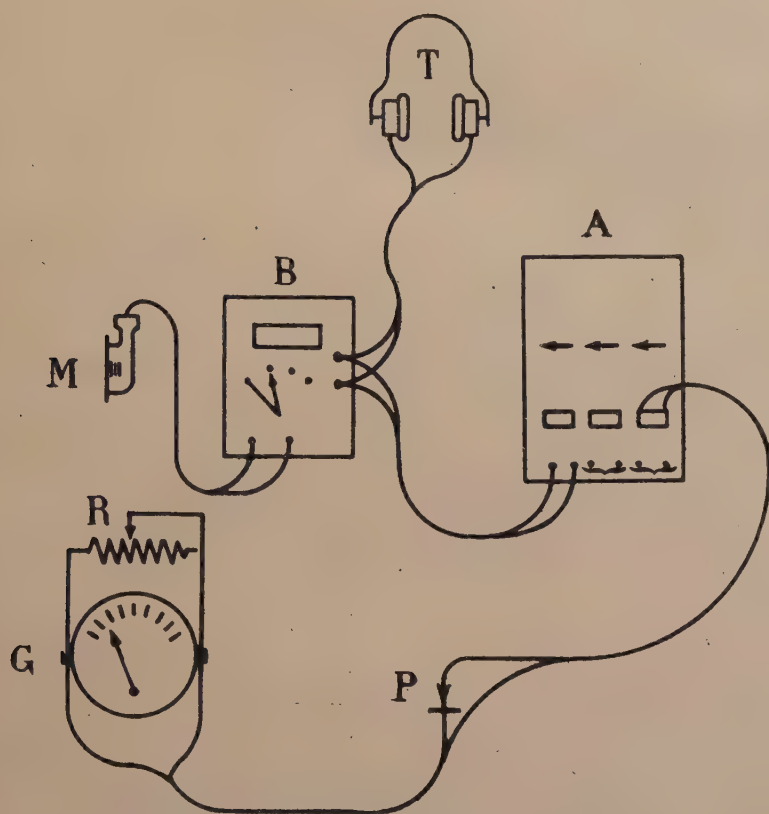


Fig. 43. — Montage du Commandant Tissot.

M. Microphone. — B. Boîte de réception I. P. M. — T. Casque téléphonique de 70 ohms. —
A. Amplificateur n° 2 de la télégraphie militaire. — P. Détecteur de T. S. F. — G. Galvano-
mètre. — R. Shunt réglable du galvanomètre.

parfaitement calme, le galvanomètre indique encore les stoppages et mises en marche d'un torpilleur à 1500 mètres, lorsque le microphone est mouillé à la manière d'une mine, c'est-à-dire, suspendu à un flotteur immergé amarré à une gueuse de fonte. Mais, dans des conditions autres, alors que l'oreille y parvient sans peine, le galvanomètre ne peut plus déceler des bruits de navires, même à faible distance, l'aiguille oscillant d'une façon désordonnée sous l'impulsion des bruits parasites.

Ne sait-on pas, d'autre part, que l'audition au phonographe, mieux que l'observation à la loupe des sillons du disque inscrit, permet de distinguer les hauteurs et les timbres des voix et des instruments.

C'est la difficulté d'interpréter les observations des galvanomètres, et non le manque de sensibilité des appareils, qui interdit l'emploi des méthodes dites objectives, pour la détection des sous-marins.

Même dans les meilleures conditions possibles de calme et de silence, nous avons reconnu qu'il était indispensable de doubler l'observation du galvanomètre en écoutant, pour savoir reconnaître les déviations accidentelles de l'aiguille et n'en tenir aucun compte (bruits éloignés, mouvements à bord).

IV. — DIRECTION DU SON DANS L'EAU. MÉTHODE DE RECHERCHE PAR MAXIMUM HYDROPHONE I. P. M.

M. J. Perrin pensa, le premier, à se servir, pour rechercher la direction d'un son propagé dans l'eau, d'un cône dont la paroi serait constituée par un *espace vide* compris entre deux troncs de cônes en tôle, emmanchés l'un dans l'autre, et soudés le long de leurs circonférences de bases sur deux cales annulaires de quelques millimètres d'épaisseur (fig. 14). On sait que les sons ne se propagent pas dans le vide, et que par conséquent une telle paroi devait constituer un écran pour les sons propagés dans l'eau. Il était probable, en raison de la faible densité relative de l'air par rapport à l'eau, qu'il serait sans inconvénient que l'espace compris entre les deux troncs de cônes et les cales annulaires fût plein d'air. Ne sait-on pas en effet que « les sons ne sortent pas de l'eau » et que la navigation d'un vapeur n'est silencieuse qu'en apparence, puisque les microphones immergés révèlent une émission puissante de bruits et de sons, souvent perceptibles à plusieurs kilomètres.

Nous avons vérifié d'autre part qu'une feuille de tôle de 5 millimètres d'épaisseur, comptait aussi peu dans l'eau qu'une feuille de papier dans l'air, et transmettait purement et simplement, les pressions et dépressions : *Un cône en feuille de tôle est inefficace dans l'eau pour la recherche de la direction.*

Sans se préoccuper de la réalisation probablement inutile d'un espace vide d'air, et suivant le dispositif ci-dessus décrit, M. J. Perrin me chargea de faire construire et d'étudier les propriétés directives d'un cône à paroi d'air de 400 mm. de longueur et 25 degrés d'angle. L'appareil aux essais se montra directif.

L'application des propriétés directives des cônes dans l'eau ne devint réellement pratique qu'à la suite des résultats satisfaisants obtenus avec des cônes à *parois de plomb* (fig. 15), proposés par M. J. Perrin, ces derniers moins fragiles que les précédents, et plus faciles à construire. Le choix du plomb se justifie par la grande inertie du métal et sa faible élasticité.

HYDROPHONE I. P. M. — APPAREIL POUR L'ÉCOUTE A BORD DES BATIMENTS DE SURFACE STOPPÉS. — *Description.* — Il se compose (fig. 15 et 16).

1° D'une boîte microphonique étanche I. P. M. du type précédem-

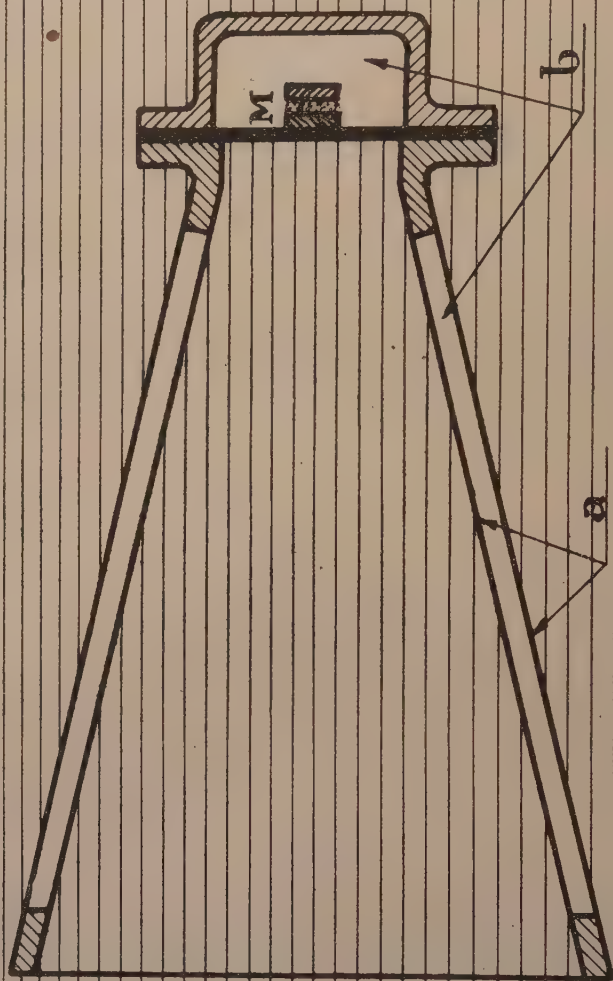


Fig. 14. — Cône à paroi vide.

a. Tôle. — *b.* Vide ou air.

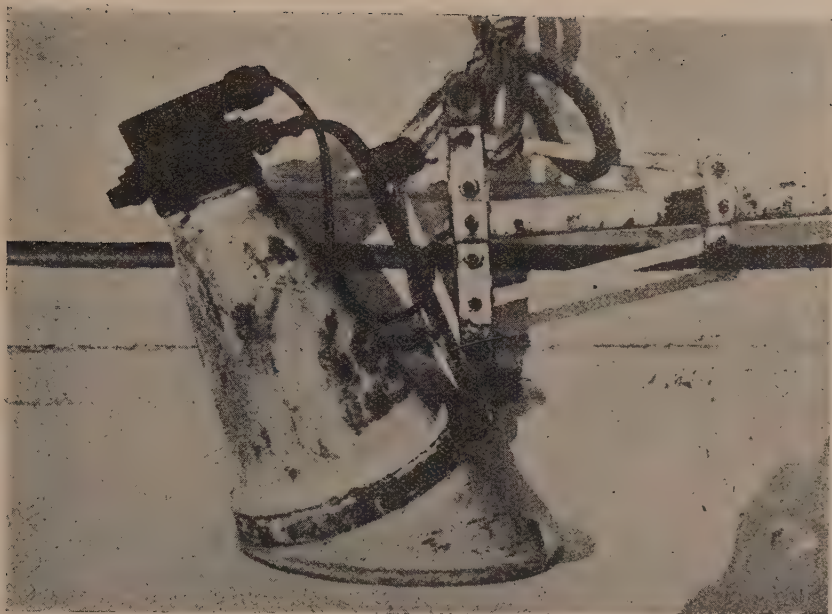


Fig. 15. — Cône à paroi de plomb.

ment décrit, fixée par quatre boulons contre la petite base d'un tronc de cône à base oblique (la grande base inclinée de 45° sur l'axe du cône) en feuille de plomb de 4 millimètres d'épaisseur, mesurant 400 mm. de longueur suivant l'axe, 25° d'angle et 9 centimètres de diamètre à la petite base. (Nous expliquerons les raisons qui ont fait adopter un tronc de cône oblique).

2° D'une suspension orientable munie d'un joint à la cardan assurant l'horizontalité du cône quelle que soit la position du bâtiment.

La suspension se compose de deux tubes de 5 mètres de longueur, montés bout à bout. Elle supporte le cône par l'intermédiaire de deux bagues de caoutchouc, et lui assure l'immersion nécessaire de 5 mètres. L'orientation du cône est commandée par un volant et un jeu de poulies montés sur un châssis métallique. La poulie solidaire du volant porte un cercle gradué; un index fixé au cadre facilite la lecture des angles.

3° D'une boîte de réception contenant le casque d'écoute, un transformateur, trois piles et un commutateur à quatre contacts permettant de couper le circuit, ou d'y introduire 3, 2 ou 1 pile.

Méthode pour la recherche du maximum. — Le cône étant orienté à peu près vers la source sonore, on constate qu'en le faisant tourner soit vers la droite, soit vers la gauche de 20° environ, le son perçu par l'oreille ne change pas beaucoup de force. Dans ces conditions la méthode à suivre pour obtenir la direction la plus exactement possible, est la suivante :

Après avoir déterminé approximativement la direction du vrai maximum, dépointer le cône jusqu'à ce que l'oreille ait la sensation nette que le bruit diminue; à ce moment précis noter la position de l'index.

Tourner le cône en sens inverse; le bruit commence par augmenter, passe par un maximum, puis diminue à nouveau; noter la nouvelle position de l'index.

L'angle compris entre les deux positions extrêmes de l'index est l'angle d'incertitude. La direction du bruit est la bissectrice de cet angle.

Valeur de l'appareil. — Comme nous avons déjà eu l'occasion de le signaler, l'hydrophone I. P. M fut le premier appareil qui permit de déterminer la direction de propagation d'un son dans l'eau, par une méthode de maximum.

On jugera de la valeur de l'appareil au point de vue de son application d'après l'extrait ci-dessous de l'un des procès-verbaux de la commission de microphonie de la marine (30 janvier 1917):

« D'un torpilleur stoppé, les écouteurs, les yeux bandés, suivaient à l'écoute les évolutions d'un sous-marin immergé naviguant périscope haut. Naturellement, les observateurs n'ont jamais eu la vision du

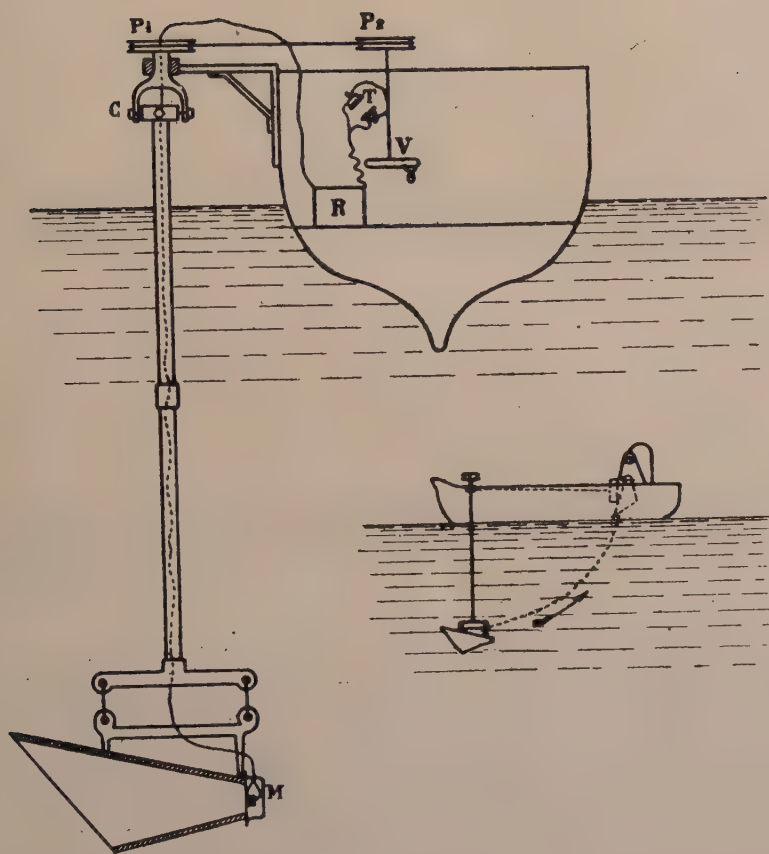


Fig. 16. — Hydrophone I. P. M

L'écoute terminée, l'appareil est relevé le long du bord avant que le navire ne se remette en marche.

M. Microphone. — C. Cardan. — P_1 , P_2 . Poulies. — V. Volant
R. Boîte de réception. — T. Téléphones.

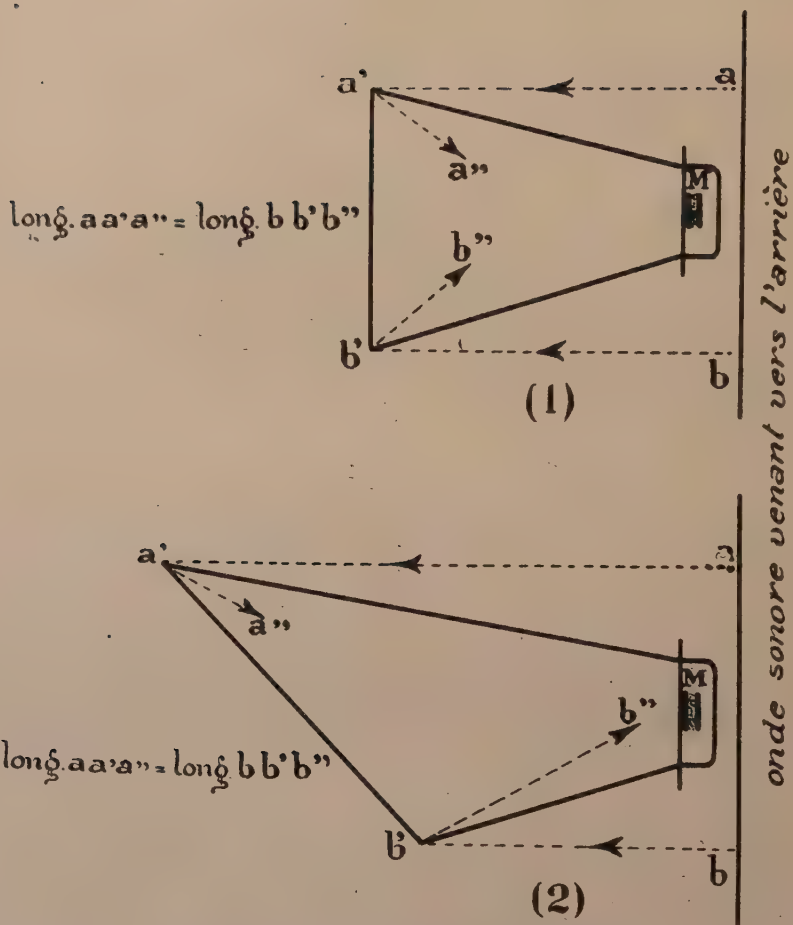


Fig. 17. — Onde sonore venant vers l'arrière.

Dans les deux cas de figures (1) et (2).
Longueur $aa'a'' =$ longueur $bb'b''$.

« périscope. Nous notons qu'au cours des expériences, il est arrivé à
 « plusieurs reprises, lorsque le sous-marin naviguait périscope haut, que
 « le torpilleur ayant perdu de vue le périscope, les appareils I. P. M.
 « ont donné des indications précises pour le faire retrouver facilement
 « à la jumelle. »

Faux maximum. — *Cônes droits et cônes à base oblique.* — Nous avons décrit et représenté (fig. 16), un *tronc de cône à grande base oblique*. Nous allons exposer les raisons importantes qui nous ont conduit à monter les hydrophones I. P. M. avec des cônes de ce genre.

Les premiers appareils I. P. M. avaient été montés avec des cônes droits. On s'aperçut qu'ils présentaient un inconvénient grave qui aurait fait renoncer à leur emploi militaire s'il n'avait été possible d'y remédier.

Les cônes droits possèdent un faux maximum de sensibilité pour une direction de leur ouverture exactement opposée à la direction de propagation du son. En d'autres termes, les cônes droits qui permettent de différencier nettement la direction de propagation d'un son, de la direction à 90° , ne la différencient qu'insensiblement de la direction à 180° . Les fausses déterminations attribuées au faux maximum des cônes droits atteignaient à l'école d'écoute, en avril 1917, l'énorme proportion de 45 pour 100.

Le fait s'explique : on se rend compte en effet, en appliquant le principe d'Huygens, que la plaque réceptrice d'un microphone fixé à l'arrière d'un cône droit, est atteinte en concordance de phase par le son dont l'onde plane se propage indifféremment vers l'ouverture du cône ou en sens opposé (fig. 17, croquis 1). Dans ce dernier cas en effet, tous les points de la circonférence de la grande base du cône se comportent comme autant de sources sonores synchrones, équidistantes de la plaque vibrante ; le son parvient donc « en phase » au microphone.

Me basant sur cette explication, je pensai qu'il suffirait d'incliner la grande base du tronc de cône par rapport à son axe pour « déphaser » les sons propagés vers l'arrière du cône, et différencier ainsi les deux directions opposées de propagation du son (fig. 17, croquis 2). Il en est bien ainsi.

Les courbes (fig. 18) mettent nettement en évidence la différenciation du faux et du vrai maximum par le tronc de cône à base oblique.

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES PROPRIÉTÉS DIRECTIVES DE CONES DROITS ET OBLIQUES. — Afin d'étudier les propriétés directives des hydrophones I. P. M., j'intercalai le microphone de l'un de ces appareils dans un circuit de mesure Tissot (ch. III) ; je pointai le cône sur une source de son fixe, puis par rapport à cette dernière successivement à 30, 60, 90, 120, 150 et 180 degrés. Je notai pour chacun de ces pointages la posi-

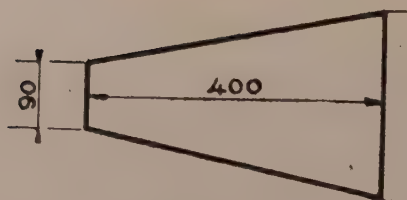
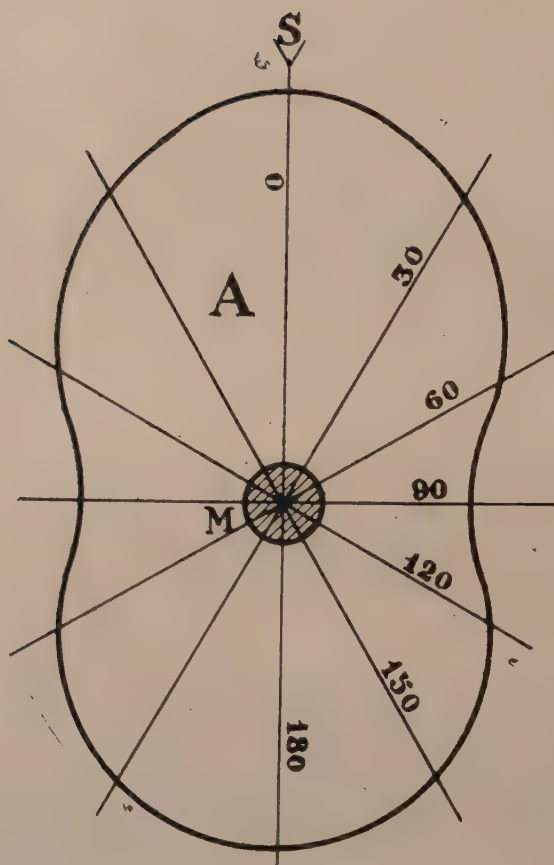


Fig. 18.

Cône A. Tronc conique droit.
Poids 31 kg.

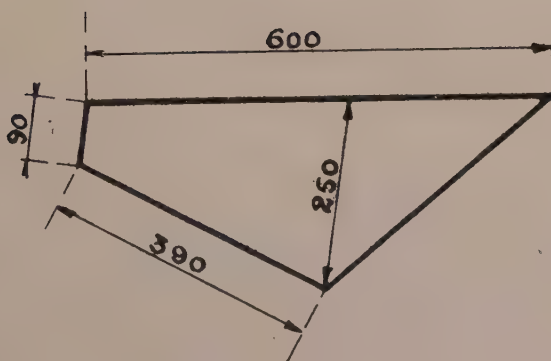
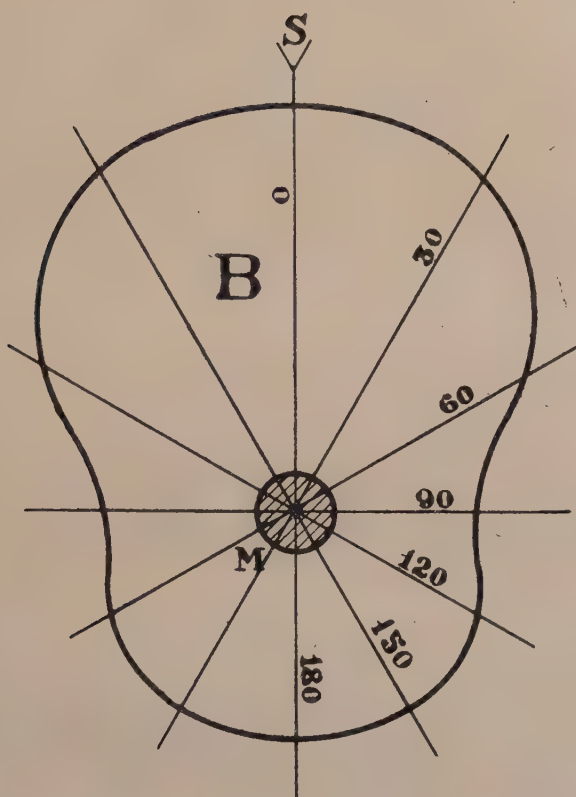


Fig. 18 bis.

Cône B. Tronc conique à base oblique.
Poids 26 kg.

tion de l'aiguille du galvanomètre. Les courbes (fig. 18) expriment les résultats des mesures.

Elles sont construites en coordonnées polaires. L'axe principal de coordonnées est la direction M. S. (microphone sonnerie). Les déviations du galvanomètre correspondant aux divers pointages du cône sont portées à partir du point M sur des directions faisant avec l'axe M. S. des angles égaux à ceux de l'axe du cône avec la direction MS.

Les petits cercles décrits des points M comme centres, ont pour rayon la valeur moyenne de la déviation du galvanomètre, correspondant à la sonnerie stoppée; ils représentent les divers bruits parasites.

Les expériences ont été faites à bord de la goëlette du centre des inventions, mouillée dans le port de Bandol, par fonds de 5 mètres.

Le cône était immergé à une profondeur de 3 m. 50 et fixé à l'extrémité de sa suspension habituelle.

La source de son, immergée également à 5 m. 50 de profondeur et à 16 mètres du cône, était constituée par un battant de sonnerie électrique frappant les parois d'une boîte étanche qui le contenait.

Observation des courbes. — 1° Elles ont une grande analogie de forme avec les courbes qui représentent, en télégraphie sans fil, la répartition de l'énergie rayonnée par une antenne inclinée.

2° Elles mettent en évidence la quasi-équivalence du cône droit et du cône oblique avec cependant une faible supériorité de ce dernier, pour distinguer l'une de l'autre la direction de la source du son, de la direction à 90 degrés.

Le rapport des intensités correspondant aux positions 0 et 90, en tenant compte des déviations dues aux bruits parasites, est, pour le cône droit 2,52, et pour le cône à base oblique 2,5.

5° Elles mettent en évidence la supériorité du cône oblique sur le cône droit, pour distinguer la direction de la source sonore de son, de la direction opposée.

Le rapport des intensités correspondant aux positions 0 et 180 est, pour le cône droit 1,18 et pour le cône à base oblique 2.

4° Les courbes représentent enfin l'étalement du maximum principal dans un angle total de 40°.

Cette observation coïncide avec l'expérience d'une longue pratique, elle justifie la méthode de recherche du maximum précédemment exposée.

SEUIL DE LA SENSATION AUDITIVE. — COMMUTATEURS A 4 CONTACTS DES BOÎTES DE RÉCEPTION I. P. M. — M. J. Perrin a signalé à diverses reprises, et d'une façon très générale, l'intérêt qu'il y a, chaque fois qu'on fait des comparaisons acoustiques (c'est le cas lorsqu'on emploie un appareil de

direction à maximum), à se rapprocher de la limite d'audition minimum perceptible. On observe en effet qu'il existe un seuil à la sensibilité auditive, ce qui signifie qu'en dessous d'une certaine limite, les sons ne sont pas perceptibles pour l'oreille. On observe également qu'en dessus de cette limite, l'intensité de la sensation croît très rapidement, bien que l'intensité d'émission du son n'augmente que lentement. La sensation de son fort est bientôt atteinte; il devient alors difficile de reconnaître entre deux sons forts, lequel est le plus fort; pour rendre plus saisissante cette observation, le professeur américain Sabine s'exprimait ainsi : « la millième partie d'un son fort est un son fort; seulement la millionième partie est un son faible ». Signalons dans le même ordre d'idées que, dans un rapport du 7 juin 1917, M. le commandant Barthelemy, directeur de l'école d'écoute, remarquait que l'on trouve dans les brouillons des procès-verbaux des écouteurs à bord de torpilleurs, des notes de ce genre : « trop près d'abord pour discerner un maximum ».

Tenant compte de ces observations, on aboutit à cette conclusion pratique qu'il y a parfois intérêt à réduire la sensibilité d'un appareil acoustique, de manière à placer les intensités des sons perçus que l'on veut comparer, entre les limites de la région où la sensibilité de l'oreille est rapidement variable.

De même qu'un objectif d'appareil photographique porte un diaphragme Iris dont on réduit l'ouverture pour photographier un objet trop éclairé, l'hydrophone I. P. M. devait être muni d'un « diaphragme », réducteur de sensibilité; je réalisai bien simplement un tel diaphragme à l'aide d'un commutateur permettant d'intercaler à volonté dans le circuit primaire du microphone 3, 2 ou 1 pile (fig. 19).

M. le commandant Barthelemy, confirmant nos observations, recommandait aux élèves de l'école d'écoute, la sensation du maximum s'obtenant d'autant plus aisément que le son est moins fort : 1° de faire la recherche en mettant les 3 piles en circuit, et 2° lorsque le contact du sous-marin était pris, de mettre sur deux piles ou sur une pile.

Nous avons vérifié par notre procédé habituel de mesures (montage Tissot), qu'aucune cause physique ne justifie l'emploi du commutateur diaphragme dont les avantages restent basés sur des raisons d'ordre purement physiologique, liées à la sensation elle-même; nous avons reconnu en effet que les intensités perçues pour les orientations du cône à 0, 90 et 180 degrés, se trouvaient être réduites dans un même rapport relatif lorsqu'on retirait une ou deux piles du circuit microphonique.

Représentation graphique. — Les résultats précédents se prêtent à une représentation graphique assez expressive (fig. 20).

L'ordonnée OA représente l'intensité minimum d'un son perceptible.

L'ordonnée OB représente l'intensité minimum d'un son donnant la sensation de son fort.

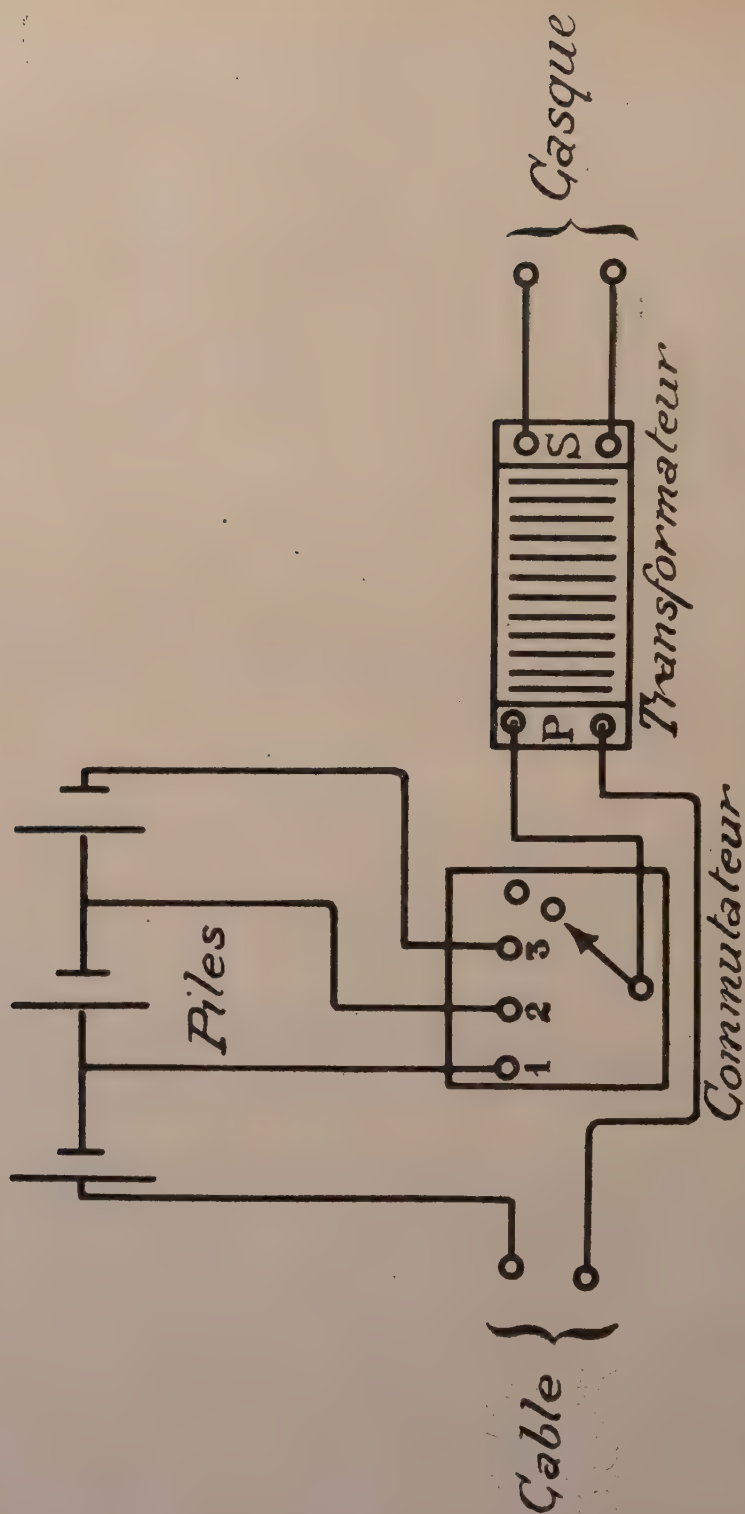


Fig. 19. — Commutateur de la boîte de réception I. P. M.

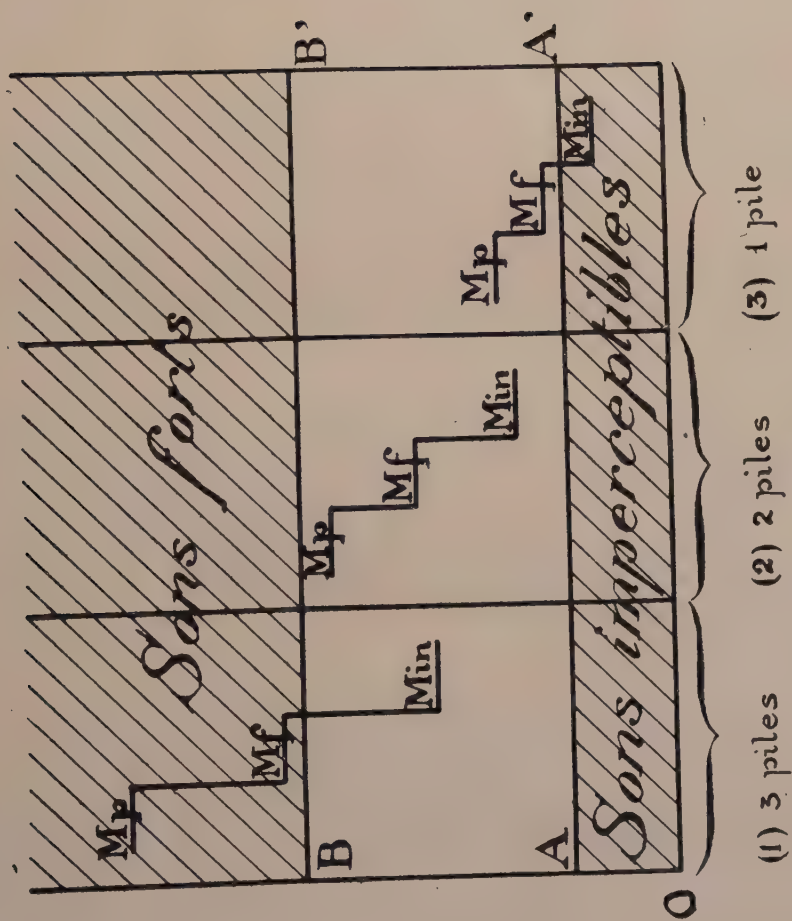


Fig. 20.

Les lignes AA' et BB' partagent le plan du graphique en 5 régions :

1° La région comprise en dessous de AA' où, leur intensité étant trop faible, les sons se trouvent être imperceptibles.

2° La région comprise entre AA' et BB' où les variations d'intensité des sons correspondent à des variations rapides de la sensation, et où les intensités des sons sont par suite comparables.

3° La région en dessus de BB' est la région de sons forts dont les intensités ne peuvent plus être comparées.

Les courbes (1), (2) et (3) (fig. 20) représentent les ordonnées des intensités correspondant au vrai maximum $M\mu$, au faux maximum Mf et au minimum Min , dans les trois cas successifs où 5, 2 ou 1 pile sont en circuit.

Courbe n° 1 (5 piles en circuit). — Le vrai et le faux maximum sont distincts du minimum, mais ils peuvent être confondus l'un avec l'autre : Bonnes conditions pour l'écoute de surveillance, mauvaises conditions pour la recherche de la direction.

Courbe n° 2 (2 piles en circuit). — Le vrai maximum, le faux maximum et le minimum sont perceptibles et distincts : Un écouteur exercé ne fera pas de confusions.

Courbe n° 3 (1 pile en circuit). — Le minimum et le faux maximum sont imperceptibles : il n'y a plus de confusion possible, les conditions les meilleures pour la recherche de la direction sont alors réalisées.

V. — DIRECTION DU SON DANS L'EAU — MÉTHODE DE RECHERCHE PAR MAXIMUM RÉSEAU DE CAPSULES J. PERRIN

Le réseau de capsules dont nous avons indiqué sommairement le principe dans l'exposé général qui précède a donné lieu à une première réalisation à bord du *Manenil*, en février 1918. L'appareil expérimenté comprenait 49 (7×7) capsules d'écoute directe, réparties sur la surface d'un rectangle de 5 mètres et 1 m. 50 de côté, montées sur une fausse coque composée de 7 caissons étanches. La figure (21) représente l'appareil quelques instants avant son immersion, suspendu le long du bord de la goëlette.

Conçu sur un principe tout à fait différent de celui de l'appareil Walser, le réseau Perrin devait présenter par rapport à ce dernier les avantages suivants :

Plus grande finesse de direction, et, par suite, élimination meilleure de bruits parasites.

Augmentation de la vitesse limite permettant l'écoute en marche.

Facilité d'installation : il est plus facile de percer dans une coque les 49 trous nécessaires à la fixation des capsules du réseau, que de découper des cercles dans les tôles, pour leur substituer des calottes Walser d'égale diamètre.

L'expérience de février 1918 permit de vérifier le principe qui servait de base à la conception de l'appareil. A la suite de cet essai, M. Perrin adressa, le 15 avril 1918, un rapport à la C. E. P. A. E. S. M. (commission d'études pratiques appliquées à la guerre sous-marine), pour exposer à cette commission de la marine le principe des réseaux plans et demander qu'un appareil de ce genre fût installé à titre d'essai à bord du chalutier *Henriette* dont disposait le centre d'études maritimes (le ministère de la marine avait repris la haute direction du centre à partir du début de 1918). Par suite de la succession rapide des événements militaires à partir du milieu de l'année 1918 et par suite aussi de la lenteur d'exécution de certains travaux dans l'arsenal, il ne fut jamais donné satisfaction à cette demande.

Le rapport de M. Jean Perrin est reproduit ci-dessous intégralement.

RAPPORT DE M. JEAN PERRIN A LA COMMISSION

C. E. P. A. E. S. M.

(15 Avril 1918)

« Les bons résultats obtenus dans l'air, tant pour la réception (écoute) que pour l'émission (porte-voix) avec les *myriaphones*, m'ont naturellement conduit à étendre le principe de ces appareils.

« On sait quel est ce principe : un grand nombre de prises de son, identiques (de simples cornets dans le cas de l'air) captent l'énergie sonore. Cette énergie sonore pour chaque prise s'engage dans un tuyau cylindrique, où elle se conserve approximativement (le tuyau doit être, autant que possible, rigide, large, et de matière non conductrice). Les divers tuyaux, groupés (par exemple) par 7, accolent leurs extrémités en un carrelage qui forme le fond d'un cornet allongé, qui peut être de nouveau conjugué avec d'autres cornets (*myriaphones* de second ordre), jusqu'à un cornet qui conduit le son au fond de l'oreille (fig. 22).

« L'amplitude de la vibration près du tympan est la somme algébrique des amplitudes des vibrations, séparément dues à chaque prise de son. Si ces amplitudes arrivent en phase, l'amplitude totale est proportionnelle au nombre des prises, et par suite l'intensité du son au carré de ce nombre. Tout le problème consistera à faire arriver en phase les impulsions dues à la source qu'on veut écouter, et en discordance de phase des bruits parasites.

« Si cette discordance est tout à fait irrégulière, on peut s'assurer que l'amplification du bruit parasite par le *myriaphone* sera d'autant moins importante qu'il y aura plus de prises de son. Il faut pour cela que les dimensions du *myriaphone* soient au moins comparables aux longueurs d'ondes des sons écoutés.

« Dans l'air la réalisation est facile. Les bases des cornets élémentaires sont dans le même plan : les tuyaux ont des longueurs égales. Le *myriaphone* amplifie alors tout bruit qui arrive dans la direction de son axe. Les bruits latéraux sont d'autant moins amplifiés qu'ils sont plus obliques et que les dimensions du *myriaphone* sont plus grandes. Le « champ » de l'appareil est donc d'autant plus réduit que l'appareil est plus grossissant. On tourne successivement l'appareil vers les diverses directions suspectes comme on explore le ciel avec une lunette. »

Prises de son. — « Dans l'eau, de notables modifications doivent être apportées. La prise de son pourra être une capsule manométrique aussi amortie que possible, M. Marcelin a cherché sur ma demande le meilleur type de capsule. Il a présentement arrêté un type de série en détermi-

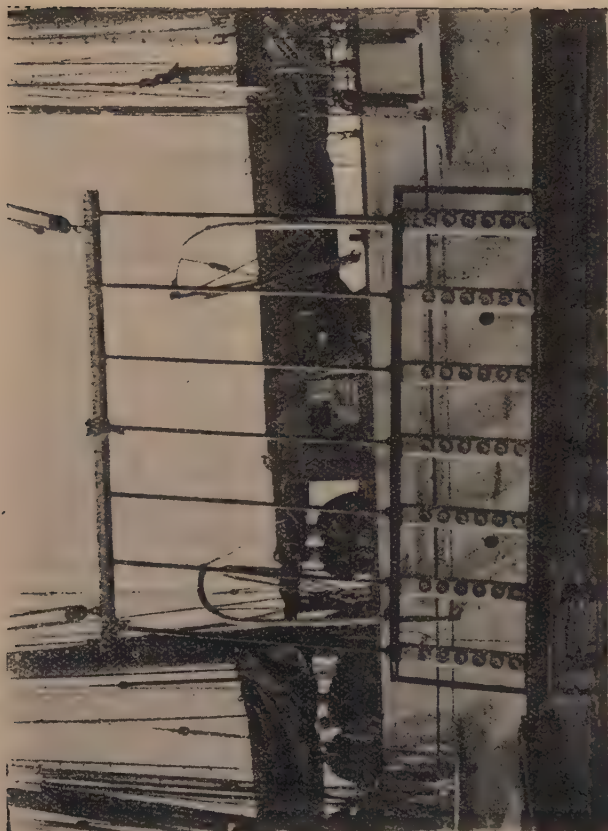


Fig. 21. — Réseau de Capsules de M. J. PERRIN.

nant le diamètre optimum et imposant de bonnes conditions d'amortissement (cales de caoutchoucs). Les études antérieures sur les géophones, et les calculs de M. Langevin nous ont été utiles. La prise de son pourrait être aussi bien une prise américaine de caoutchouc (genre tube C), ou toute autre à déterminer ultérieurement. On prendra la meilleure quelle qu'elle soit. Cette prise sera placée comme une ventouse sur la coque du bateau, laissant pénétrer par un trou, dans l'intérieur, le tube qui sort du fond de la prise de son.

Direction. — « La recherche de la direction offre beaucoup plus de difficultés dans l'eau que dans l'air. On ne peut songer, en effet, à tourner à chaque instant l'appareil, c'est-à-dire le bateau, de façon à explorer l'horizon. Mais on peut mettre la réception en phase sur une direction quelconque en corrigeant convenablement la longueur du tuyau qui émane de chaque prise, soit par allongement ou raccourcissement discontinu comme dans le cornet à piston, soit par allongement ou raccourcissement continu comme dans le trombone à coulisse.

« Sur ce principe M. Marcelin a imaginé de façon entièrement personnelle deux types de commutateurs. Les rapports correspondants se trouvent dans les archives du Centre.

« On conçoit qu'il n'est pas commode de corriger en même temps un grand nombre de tubes, je me suis limité à une correction devant porter sur 7 tubes (6 en réalité, le tube central restant inchangé).

« Chacun de ces tubes devait émaner d'un caisson contenant une file verticale de 7 prises, assemblées en phase (tubes égaux). Le nombre des prises était de 49. L'expérience a été faite dans ce sens sur le *Manenil* avec commutateur discontinu permettant la détermination de la direction à 15° près ».

On m'a fait observer :

« 1° Qu'il n'y avait pas de ligne pratiquement verticale, sur un bateau, même du type cargo;

« 2° Qu'il serait difficile d'amarrer solidement des caissons verticaux et que les qualités nautiques en souffriraient gravement.

« 3° Que, cela fût-il réalisé, le roulis inévitable écarterait à chaque instant chaque file de la verticalité, en sorte que les prises de 7 files ne seraient plus en phase.

« Je renonce donc à de longues files verticales et je propose l'assemblage de 7 groupes de 5 prises, chaque groupe sera formé de 5 prises placées côte à côte en ligne verticale (le déphasage correspondant à la forme du bateau, ou au roulis, devenant ici négligeable).

« 2 myriaphones de ce genre (21 capsules) seraient montés sur les 2 bords, pour écoute binauriculaire. L'expérience paraît possible sur un bateau genre *Henriette*. A titre de simple essai préliminaire, et en atten-

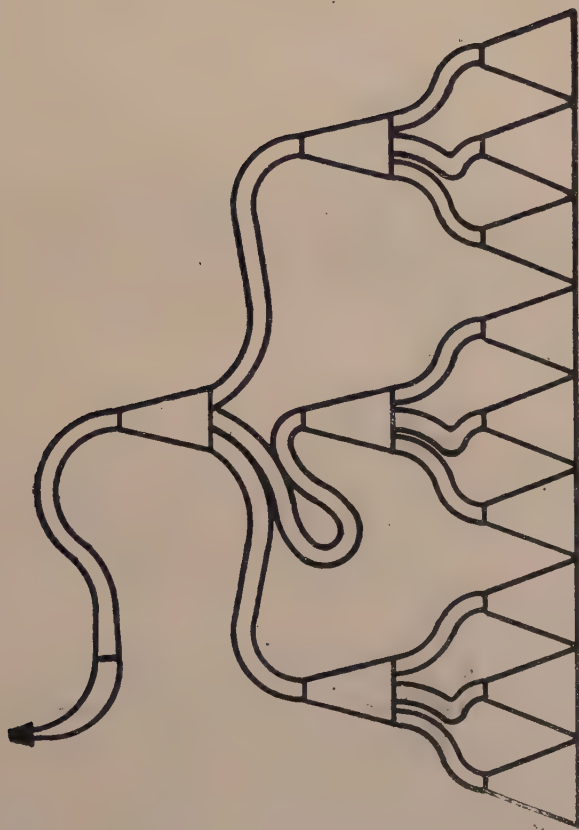


Fig. 22. — Myriaphone J. PERRIN.

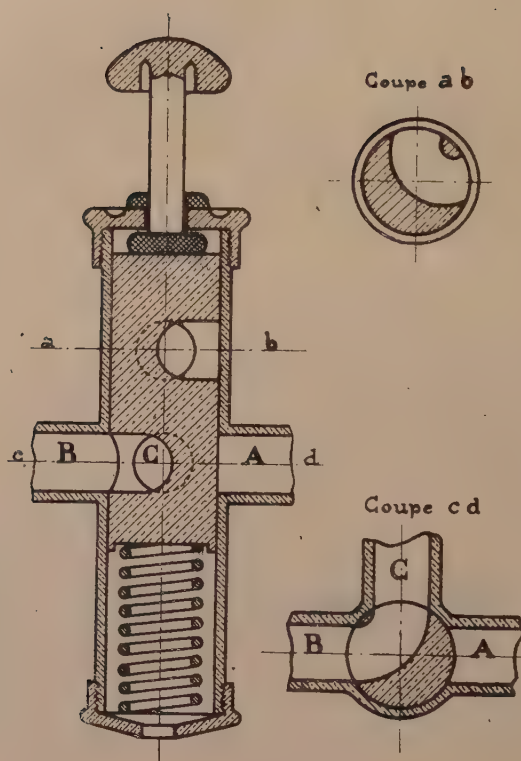


Fig. 23. — Comparateur à piston.

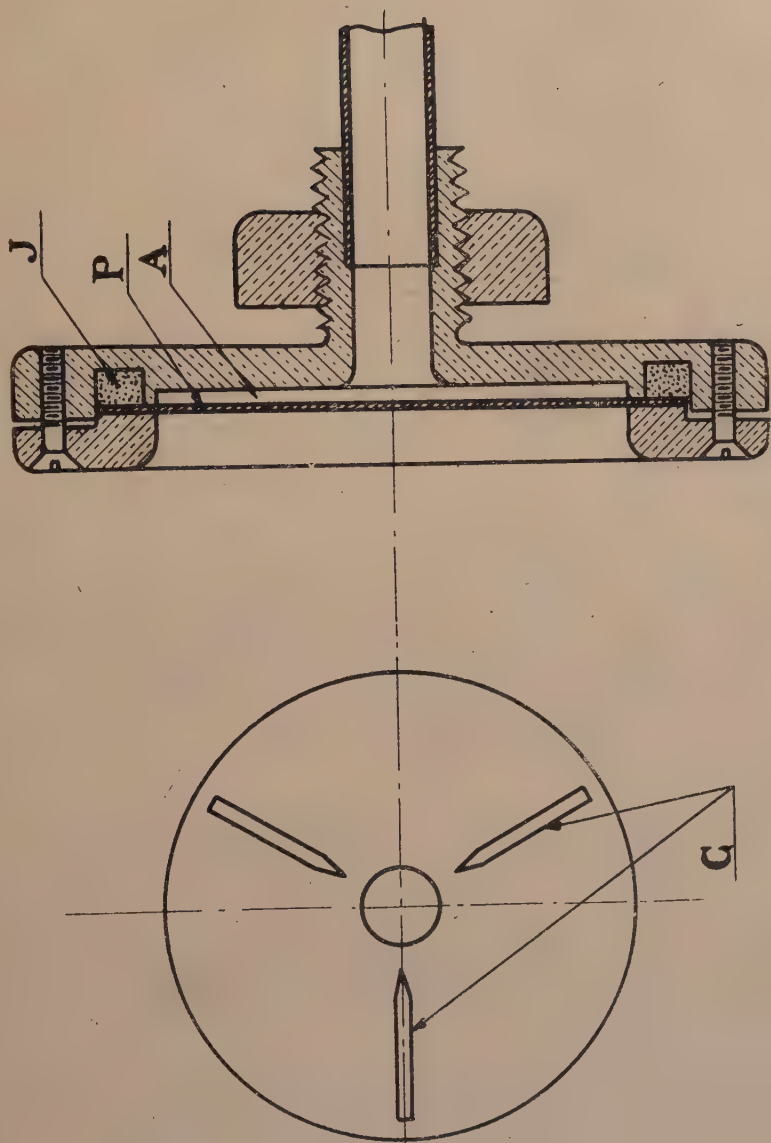


Fig. 24. — Capsule d'écoute directe.

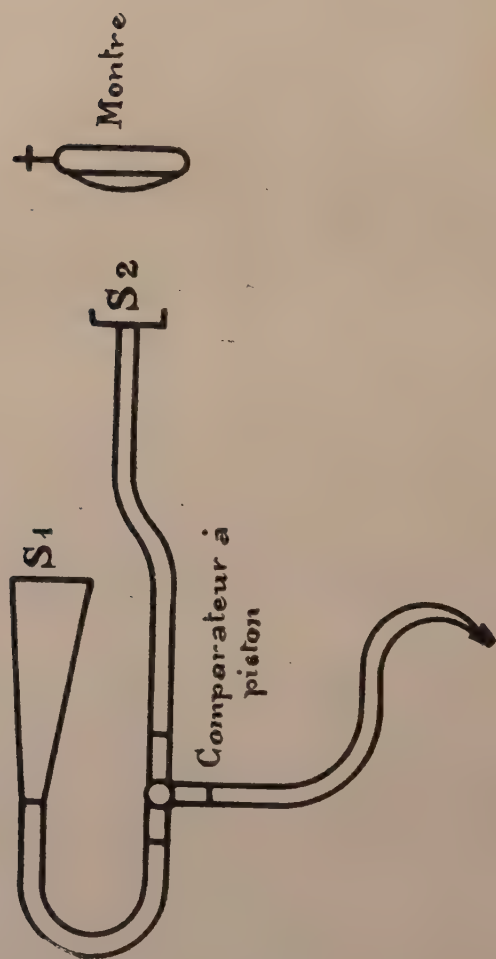


Fig. 25. — Comparaison des suites d'angles différents.

dant la construction du matériel nécessaire, je demande qu'on utilise, pour 2 groupes chacun de 4 capsules, les vannes déjà percées sur l'*Henriette*, et cela d'après les dessins détaillés exécutés dans ce but par M. Marcelin (l'écartement des vannes 56 cm. est un peu trop faible).

« *J'insiste sur l'urgence à mon avis extrême de ces genres de travaux.*

Protection des cargos. — « Dans le cas d'un bateau de tonnage élevé, on pourra réaliser un myriaphone de second ordre formé par exemple de 5 réseaux de 7×5 capsules disposées en longueur suivant une ligne d'une douzaine de mètres.

« La correction de la direction se ferait d'un même coup à l'intérieur de chaque réseau, et pour les tubes extrêmes. La puissance d'écoute de semblables appareils peut être très grande et leur indifférence aux bruits parasites suffisante pour que le cargo puisse écouter en pleine marche.

« La Commission demande, avant de prendre une décision, à vérifier que l'audition se fait correctement pour le son arrivant en phase aux 7 capsules d'une file verticale.

ETUDES PRÉLIMINAIRES A LA CONSTRUCTION DES RÉSEAUX DE CAPSULES. — J'ai entrepris une étude systématique en vue de déterminer les meilleures dimensions à donner aux diverses pièces constituant les réseaux plans. Les résultats de cette étude sont applicables à la construction de tout appareil d'écoute directe sous-marine.

Comparateur à piston. — L'étude dont il s'agit repose sur l'emploi d'un comparateur à piston établi sur mes plans d'après les mêmes données que les pistons des instruments à vents, et construit par un spécialiste dans ce genre de fabrication (fig. 25).

Lorsque le piston est levé, l'appareil relié au tube B communique avec le tube C relié à l'oreille. Lorsque le piston est baissé, l'appareil relié au tube A communique avec le tube C.

Le passage est presque instantané; le comparateur permet d'écouter successivement un même bruit avec 2 appareils différents et ainsi d'apprécier leur valeur relative.

Des comparateurs à piston ont été employés pour les études comparatives des appareils destinés à l'écoute souterraine, à l'écoute des avions et à l'écoute sous-marine.

Étude de la capsule. — Les comparaisons successives de capsules identiques à un seul facteur variable près ont permis de déterminer l'épaisseur de la lame vibrante, son diamètre, ainsi que l'épaisseur de la chambre à air. Nous avons reconnu qu'il y a intérêt à amortir le son propre de la plaque vibrante, à l'aide de 5 petites cales radiales décou-

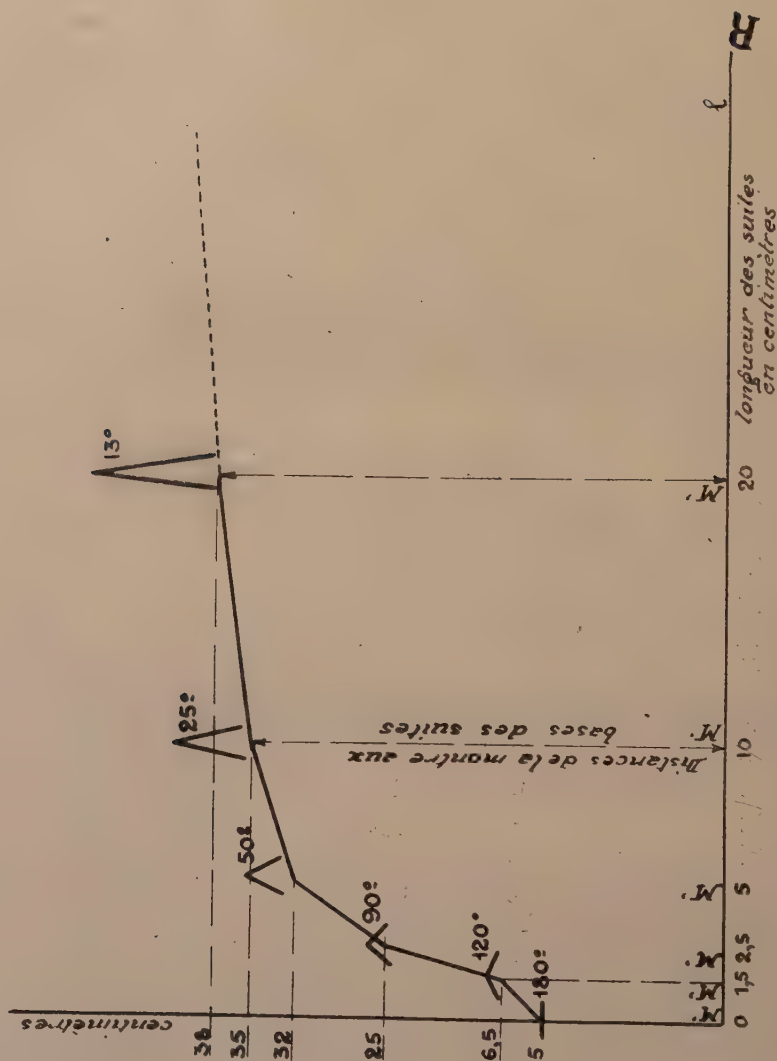


Fig. 26. — Résultat de la comparaison des suites d'angles différents.

pées dans de la feuille de caoutchouc, et écrasées de la moitié de leur épaisseur (fig. 24).

Etude des tubes acoustiques. — Nous avons reconnu qu'à longueurs et diamètres égaux, les tubes en laiton conduisent le son beaucoup mieux que les tubes en caoutchouc.

Jusqu'à un diamètre de 20 mm. intérieur, nous avons vérifié qu'il y a avantage à augmenter le diamètre des tubes acoustiques. M. Perrin a vérifié d'autre part qu'il y a encore avantage à augmenter ce diamètre au delà de 20 mm. et jusqu'à 40 mm., dans le cas de tubes de plusieurs mètres de longueur.

Angle des cornets acoustiques. — Plusieurs cornets en tôle, coniques, de même diamètre de base (60 mm.), mais d'angles différents ont été comparés successivement 2 à 2. Comme cornet de comparaison, nous avons choisi celui dont l'angle au sommet était égal à 180° . Nous cherchions, en nous maintenant dans les conditions où la sensibilité auditive est rapidement croissante, les distances $S_1 M$ et $S_2 M$ (fig. 25) des bases des cornets à une montre, telles que le tic tac fût entendu avec une égale intensité dans l'un et dans l'autre cornet, ces derniers étant réunis au comparateur par des tubes de longueurs telles que la distance acoustique de la base des cornets au comparateur fût la même pour chacun d'eux.

La courbe ci-jointe (fig. 26), construite en portant en abscisse les longueurs des tubes et en ordonnée les distances $S M$ correspondantes, met en évidence l'avantage qu'il y a, d'une façon générale, à se servir de cornets aigus, et, en outre, dans les conditions particulières de notre étude, qu'il fallait éviter de se servir des cornets dont l'angle au sommet était inférieur à 25° . Ces conclusions coïncident avec les résultats des expériences poursuivies à Saint-Cyr sous la direction de M. Perrin.

VI. — DIRECTION DU SON DANS L'EAU. — MÉTHODE
DE L'ÉCOUTE BINAURICULAIRE.
HYDROGÉOPHONES S. P. M. (à écoute directe).

GÉNÉRALITÉS SUR L'ÉCOUTE BINAURICULAIRE. — J'emprunte à un rapport de M. J. Perrin sur l'écoute souterraine le passage suivant dont la portée est générale, et s'étend en particulier à la méthode binauriculaire appliquée à l'écoute sous-marine.

« Dans la vie ordinaire, tout homme qui a ses deux oreilles en bon état, sait reconnaître de quel côté viennent les bruits qui lui arrivent par l'air. Si par exemple on lui parle, il tourne instinctivement la tête du côté de celui qui lui parle. Cet instinct, qui n'existe pas chez les hommes qui sont tout à fait sourds d'une oreille, paraît principalement dû au fait que le bruit produit en un point ne frappe pas les deux oreilles tout à fait en même temps. Le cerveau juge cependant que l'origine du bruit est unique, mais place cette origine à droite ou à gauche, suivant l'oreille qui est la première atteinte ».

« Cette propriété de notre cerveau s'applique à la recherche de la direction des bruits que transmet le sol. Il suffit d'employer simultanément deux « géophones » reliés chacun à une oreille ; le résultat est le même que si nous avions des oreilles munies de *pédoncules égaux* permettant de les coller en même temps contre le sol : nous retrouvons aussitôt la sensation bien connue du bruit qui vient « de droite » ou « de gauche ».

La méthode d'écoute binauriculaire est ancienne (brevets de la Submarine Signal Company 1908) : elle a été utilisée pendant la guerre, en premier lieu à l'instigation des services de la télégraphie militaire (général Ferrié). D'abord avec les « stéthoscopes » de la télégraphie militaire (collaboration de MM. Abraham, Jouaust et Labroust) mis en service vers avril 1915, puis quelques semaines plus tard avec les « géophones S P » (collaboration de MM. Perrin et Marcelin). Les deux types d'appareils, basés sur le même principe, ont été réalisés indépendamment l'un de l'autre : les géophones reproduisant les sons avec plus de netteté que les stéthoscopes, furent généralement préférés (rapport du G. Q. G. 12 février 1907)¹.

1. Dix mille géophones ont été montés pendant la guerre dans le laboratoire de la Sorbonne, et livrés tant aux armées françaises qu'aux armées alliées, au fur et à mesure des demandes.

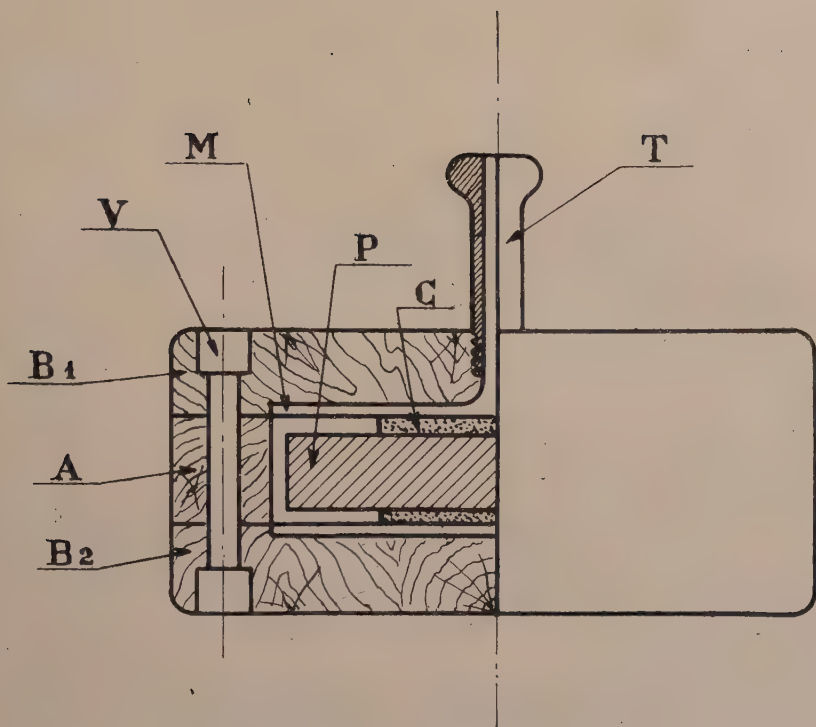


Fig. 27. — Géophone S. P. ($\frac{1}{2}$ coupe).

- M. Plaque de mica.
- P. Masselotte de plomb.
- C. Pastille de caoutchouc.
- V. Vis et boulon.
- A. Pièce annulaire centrale.
- B₁, B₂. Joints en bois.

On conçoit qu'il est facilement possible en déplaçant sur le sol deux géophones ou deux stéthoscopes, de faire « face au bruit » et de déterminer ainsi la direction de son origine : c'est la direction perpendiculaire au milieu de la ligne qui joint les deux appareils.

GÉOPHONES S. P. POUR LA GUERRE DES MINES. — Description. — Ils se présentent sous l'aspect de petits cylindres aplatis de 40 mm. de diamètre, et 30 mm. d'épaisseur, sans aucune autre partie saillante que les tétines métalliques, destinées à recevoir les tubes acoustiques reliant aux oreilles de l'observateur, les appareils posés à terre.

Un seul appareil suffit pour l'écoute de surveillance : on branche alors un tube acoustique sur chacune des deux tétines du géophone.

Deux géophones sont nécessaires pour l'écoute dirigée, on utilise alors l'une des deux tétines de chaque géophone. Certains géophones, destinés exclusivement à l'écoute dirigée, ne portent qu'une seule tétine ; tel est le cas de l'appareil représenté (figure 27).

Les géophones se composent de deux lames de mica circulaires serties entre les deux faces d'un anneau A et les faces internes des disques B₁ et B₂. Les pièces A, B₁, B₂ sont en bois tourné ; des boulons assurent l'assemblage.

Deux cavités de profondeur uniforme (1 mm. maximum) pratiquées dans les disques B₁ et B₂ (côté face interne) limitent, avec les lames de mica, deux « disques d'air » de très faible épaisseur, communiquant directement avec les tétines d'écoute.

Les lames de mica enserrent une masselotte cylindrique de plomb, par l'intermédiaire de deux pastilles de caoutchouc de 50 mm. de diamètre, centrées et comprimées.

Fonctionnement. — Le géophone étant posé à terre, l'ensemble léger des pièces de bois suit les vibrations du sol, alors que l'inertie de la masselotte de plomb immobilise les parties centrales des plaques de mica ; il résulte du mouvement relatif du boîtier et de la masselotte, que les disques d'air sont successivement comprimés et détendus. Les pressions et dépressions, qui prennent naissance, sont périodiques et de même fréquence que les sons propagés dans le sol ; elles sont transmissibles à l'oreille par l'intermédiaire de tubes acoustiques.

Les considérations théoriques développées à propos du microphone I. P. M. à inertie sélective (chapitre II) s'appliquent dans le cas du géophone S. P.

La caractéristique principale des géophones S. P. est leur fidélité due à l'amortissement de leur son propre. Les premiers géophones construits étaient des appareils à inertie liquide déjà très amortis : l'espace compris entre les plaques de mica et l'anneau central était entièrement rempli de mercure. Le système plomb-caoutchouc que nous venons de décrire

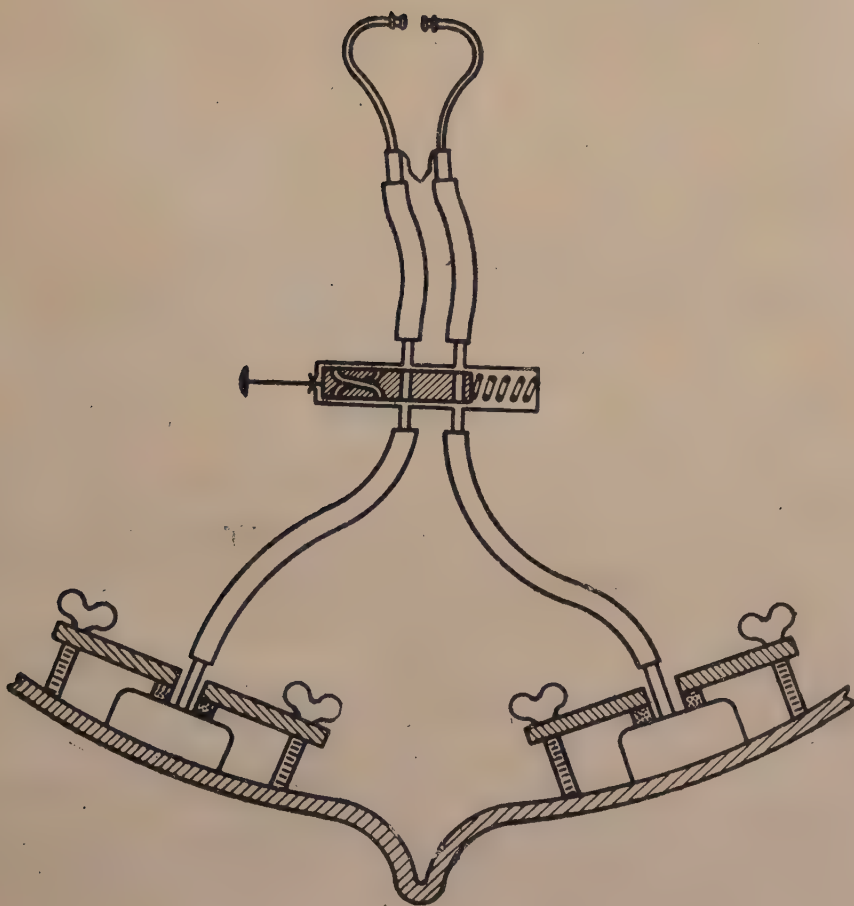


Fig. 28. — Hydrogéophones S. P. M.

permet d'augmenter encore l'amortissement, tout en réalisant l'économie résultant de la substitution d'une masse de plomb à une masse égale de mercure. Ce dispositif est dû à ma collaboration.

HYDROGÉOPHONE POUR L'ÉCOUTE SOUS-MARINE. — Les marins savent qu'en appliquant l'oreille contre la coque d'un sous-marin en plongée, en certains endroits judicieusement choisis, ils perçoivent le bruit des navires voguant à proximité. Il était probable que des géophones seraient employés avantageusement.

Les essais tentés à bord du sous-marin *Messidor*, sur mon initiative, réussirent; MM. les Commandants de sous-marins Lorfèvre et Walzer s'intéressèrent vivement à cette application des géophones et contribuèrent à son succès.

Deux géophones appliqués contre la coque (figure 28) symétriquement par rapport à l'axe du sous-marin, et à 60 cm. l'un de l'autre, permirent, le bâtiment écouteur marchant au ralenti (150 tours, soit 3 nœuds), d'entendre des bâtiments de surface à des distances qui atteignirent souvent 4 kilomètres, et de préciser par quel bord ils se trouvaient.

Ainsi que nous l'avons déjà signalé, l'écoute binauriculaire fut appliquée à bord de quelques sous-marins dès la fin de l'année 1915, par MM. Villard et Abraham, l'installation de ces appareils nécessitant la perforation de la coque.

A la suite de nos essais, en raison de la simplicité des géophones, de leur encombrement insignifiant et surtout de la facilité de leur installation, qui pouvait et devait être faite par les moyens du bord, *sans perforer la coque*, leur emploi devint réglementaire à bord des sous-marins français (D. M. du 18 septembre 1917).

Avec chaque couple d'appareils fut livré, sur ma demande, un commutateur inverseur à piston permettant de croiser les tubes, et de *s'assurer de la sensation* de droite ou de gauche, en faisant passer le bruit plusieurs fois de droite à gauche et vice versa, cela instantanément, les géophones restant fixes.

Les commutateurs inverseurs furent établis, d'après mes indications, sur les mêmes données que les pistons des instruments à vent (cornets à piston). Leur construction fut confiée à un spécialiste de ce genre de fabrication.

Bien entendu, le choix de l'emplacement des géophones fit l'objet, dans chaque cas de leur application, de la plus grande attention. M. le lieutenant de vaisseau Lorfèvre, après de nombreux essais très méthodiques, reconnut que la cale du compartiment avant convient le mieux dans la majorité des cas, parce que le compartiment avant est silencieux; le bruit propre du sous-marin y est peu perceptible.

Les ballasts ne doivent pas former double coque aux endroits choisis pour l'application des géophones; toute interposition de matières quel-

conques (peinture ou revêtements divers) entre les géophones et les tôles, doit être soigneusement évitée.

L'écoute aux géophones est impraticable lorsque le sous-marin n'est pas complètement immergé; elle est également impraticable à bord des bâtiments de surface; cela en raison du bruit des vagues qui viennent heurter la coque à proximité du point d'application des géophones, de quelque façon que l'on s'y prenne.

PRÉCISION DE L'ÉCOUTE SOUS-MARINE BINAURICULAIRE. — Un observateur même peu exercé détermine à 5 degrés près, dans l'air, et sans s'aider d'aucun appareil, la direction de l'origine d'un bruit; cette précision correspond à un écartement des oreilles de 18 centimètres environ.

La même précision dans l'eau ne peut être obtenue, nous l'avons vérifié expérimentalement, qu'en écartant les deux prises de son d'une distance égale au produit de l'écartement des oreilles, par le rapport des vitesses du son dans l'eau et dans l'air, $\frac{1400}{330}$, soit une distance de 75 centimètres.

En éloignant ou rapprochant davantage les prises de son, on augmente ou diminue la précision des pointés acoustiques.

RECHERCHE DE LA DIRECTION AVEC DEUX PRISES DE SON FIXES. — Nous avons vu précédemment que deux prises de son fixes permettent de déterminer dans un milieu quelconque : air, terre ou eau, si un bruit vient de droite ou de gauche par rapport à une direction de référence perpendiculaire à la ligne qui joint les deux prises de son.

Se basant sur les résultats de l'expérience bien connue du trombone de Kœnig, on voit qu'il doit être possible en usant de prises de son fixes et de tubes à coulisses, de rétablir la sensation de milieu pour une direction oblique; l'allongement de l'un des tubes à coulisse, compense la différence de marche de l'onde plane qui atteint successivement l'une et l'autre prises de son, et lui sert de mesure. Cela nécessite que la vitesse de propagation du son soit connue exactement dans des tubes correcteurs d'une part (V_1) et dans le milieu qui contient les prises de son, d'autre part (V_2).

Si a désigne la distance des prises de son et α l'angle de la direction d'un bruit avec la normale à la ligne des prises de son, les quantités V_1 , V_2 , a et α sont liées par la relation

$$\frac{a \sin \alpha}{V_2} = \frac{l}{V_1}$$

d'où :

$$\sin \alpha = \frac{l}{a} \times \frac{V_2}{V_1} = Kl$$

K désignant une constante.

Le sinus de l'angle que fait la direction d'un bruit avec la normale au milieu de la ligne qui joint les deux appareils d'écoute, est proportionnel à la différence de longueur des tubes acoustiques, nécessaire pour rétablir la sensation de milieu.

Les physiciens qui travaillaient dans les laboratoires de la télégraphie militaire, sous la direction du général Ferrié, ont tenté les premiers en 1915 d'appliquer la méthode des tubes correcteurs à la recherche de la direction dans la guerre de mine; ils n'ont pas pu aboutir à un résultat pratique parce que le facteur de proportionnalité K est indéterminé dans le cas de l'écoute souterraine; la vitesse de propagation du son dans la terre, est en effet variable d'un terrain à un autre, et même d'un point à un autre point voisin du premier dans un même terrain, cela en raison du manque d'homogénéité du milieu et de la présence des rochers et fissurés.

Cette difficulté, insurmontable dans le cas de l'écoute terrestre, disparaît dans le cas de l'écoute sous-marine et j'ai pu vérifier qualitativement et quantitativement le principe de la méthode: j'ai utilisé à cet effet, des tubes à coulisses d'instruments à vent; j'ai reconnu que la vitesse normale de propagation du son dans l'air pouvait être prise comme vitesse de propagation du son dans les tubes correcteurs, à condition que ces derniers eussent un diamètre intérieur de 20 millimètres au minimum.

VII. — ÉTUDE EXPÉRIMENTALE SUR LA PROPAGATION DU SON DANS LA MER

A. — Interférences acoustiques.

Des anomalies avaient été observées à diverses reprises au cours d'expériences d'écoute dans la mer, particulièrement la suivante :

Plusieurs observateurs, à bord de la goélette *Manenil* du centre des inventions mouillée en rade de Toulon, suivaient avec des microphones, les évolutions d'un sous-marin. Les microphones étaient immergés à la même profondeur, ils s'agissait de les comparer entre eux ; les observateurs, indépendamment les uns des autres, pointaient les instants précis des stoppages et mises en marche du sous-marin. Le commandant du sous-marin, s'étant assuré de la concordance de son chronomètre avec ceux mis à la disposition des observateurs, notait de son côté les instants des diverses manœuvres de son bâtiment.

En comparant les temps inscrits par les observateurs d'une part, par le commandant du sous-marin d'autre part, on constata que tous les observateurs avaient noté un stoppage à l'instant précis où, sans changer de marche, le sous-marin avait augmenté sa profondeur d'immersion, passant d'une immersion de 8 mètres à une immersion de 18 mètres, cela à 1000 mètres des microphones.

Un peu hâtivement, certains crurent devoir conclure de ce fait isolé, que l'écoute était impuissante à déceler la présence des sous-marins en marche profondément immergés, et qu'il suffirait à un sous-marin de naviguer à 30 mètres pour échapper aux écouteurs.

De nouvelles expériences eurent lieu dans le but d'éclaircir ce point ; elles montrèrent qu'un sous-marin immergé à 30 mètres était généralement très bien entendu ; le phénomène inverse de celui qui avait attiré l'attention, fut même observé : tous les observateurs notèrent un stoppage à l'instant précis où le sous-marin se rapprochant de la surface était passé de l'immersion de 30 mètres à l'immersion de 18 mètres, cela à 1500 mètres des microphones.

La question était donc élucidée au point de vue militaire, il restait à mettre en évidence les causes physiques des anomalies constatées ; j'ai entrepris dans ce but les expériences méthodiques qui vont être décrites.

En principe, une sonnerie étanche étant immergée à profondeur fixe, le champ sonore fut exploré à diverses distances de la source de son,

depuis la surface jusqu'au fond de la mer, par un microphone progressivement immergé, et intercalé dans un circuit de mesures Tissot; la même expérience fut répétée pour diverses profondeurs d'immersion de la sonnerie.

L'expérience mit en évidence avec netteté l'existence de *phénomènes interférentiels résultant principalement de la composition des mouvements vibratoires issus de la sonnerie, et de son image par réflexion sur la surface*. La répartition des maximums et des minimums d'intensité obéit à la même loi que celle des franges d'interférences découvertes par Fresnel et particulièrement des franges obtenues par réflexion unique, la source elle-même interférant avec son image. Un minimum d'intensité sonore coïncide avec la surface réfléchissante, de même que dans le cas des franges de Fresnel obtenues par interférence des rayons directs et réfléchis issus d'une même source, une frange obscure coïncide avec le plan réfléchissant¹.

Ce fait est normal; la théorie prévoit, en effet, que la réflexion sur la surface de séparation, de deux milieux d'indices de réfraction différents se fait avec changement de signe quand le milieu qui contient le rayon incident et le rayon réfléchi est celui dont l'indice est le plus élevé; tel est le cas dont nous nous occupons.

LOI DES INTERFÉRENCES. — Désignons par S une source sonore ponctuelle matérialisée par une sonnerie étanche, par exemple.

Par S' son image par rapport à la surface réfléchissante R de la mer (fig. 29).

La réflexion se fait avec changement de signe; la surface R, lieu géométrique des points équidistants de S et S', est une « zone silencieuse ». Les autres zones silencieuses sont des surfaces de révolution autour de l'axe SS', ce sont des hyperboloïdes dont les génératrices sont définies dans le plan de la figure, par la condition $MS' - MS = K\lambda$, où λ désigne la longueur d'onde émise par la source sonore, et K un nombre entier. S et S' sont les foyers des hyperboles génératrices.

Lorsque la distance D de la source sonore à la verticale MM' passant par le microphone, est grande par rapport à la distance d de la source sonore au plan réfléchissant, la distance x de deux zones silencieuses consécutives, mesurée le long d'une verticale, à proximité de la surface R, est donnée à un infiniment petit près, par la relation

$$(1) \quad \frac{\lambda}{2d} = \frac{x}{D} \text{ (triangles (MOM') et (SAS'))}$$

1. En même temps que moi mais indépendamment, M. Perrin constatait que des franges d'interférence se forment dans l'air avec coïncidence d'une région où l'intensité sonore est maximum avec la surface réfléchissante, lorsqu'on maintient une source de son (sonnerie de réveille-matin) au-dessus de la surface de l'eau (surface d'un lac).

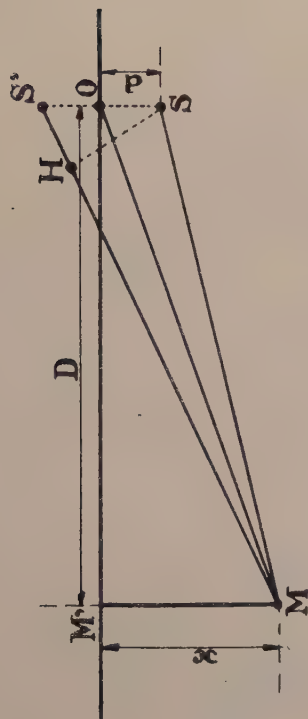


Fig. 29.

Distances en mètres

400^m

Surface de la mer

200^m

100^m

R 0



Sous-marin

Fig. 30. — Répartition des minimums interférentiels dans la mer.

De 0 à 400 mètres de distance.
Pour un sous-marin immergé à 30 mètres.
Pour une longueur d'onde de 0 m. 80 (λ_0).

d'où :

$$(2) \quad x = \frac{\lambda D}{2d}.$$

La profondeur y du maximum d'intensité le plus voisin de la surface est donnée par la relation

$$(3) \quad y = \frac{\lambda D}{4d}.$$

APPLICATION NUMÉRIQUE. — Considérons le cas (fig. 30) d'un sous-marin immergé à 50 mètres, évoluant le long d'une circonférence de 800 mètres de rayon dont un microphone immergé à 10 mètres occupe le centre. Supposons que le bruit du sous-marin comprenne entre autres une émission très intense en (la_s) (1740 vibrations par seconde).

V désignant la vitesse de propagation du son dans la mer,

T désignant la durée d'une vibration double pour la note la_s on a :

$$\lambda = VT = 1430 \times \frac{1}{1740} = 0,80.$$

La distance des minimums d'intensité consécutifs à 800 mètres du sous-marin est, d'après la relation (2)

$$x = \frac{800 \times 0,80}{2 \times 50} = 10,6.$$

Soit 10 mètres environ.

Le microphone immergé à 10 mètres se trouve donc dans une zone silencieuse, il ne perçoit pas le sous-marin; il en serait de même d'un microphone immergé à 20 mètres.

Au contraire, 2 microphones immergés l'un à 5 mètres, l'autre à 15 mètres seraient situés dans deux zones sonores consécutives, et percevraient le sous-marin.

Supposons que le sous-marin vienne à se rapprocher de la surface, passant de l'immersion 50 mètres à l'immersion $\frac{50}{2} = 15$ m.; dans ces conditions, le microphone immergé à 10 mètres (toujours à 800 mètres du sous-marin) va se trouver dans une zone sonore; l'observateur aura donc noté une mise en marche du sous-marin à l'instant précis où ce dernier se sera rapproché de la surface.

Nous allons rendre compte de l'étude du phénomène interférentiel, puis nous reviendrons en détail sur ses conséquences au point de vue de l'écoute sous-marine.

DESCRIPTION DES EXPÉRIENCES, COURBES. — *Premier groupe de séries de mesures.* — Un premier groupe de séries de mesures a été fait en rade de Bandol, par fond de 6 m. 50. La sonnerie et le microphone étaient

suspendus, l'un à l'avant et l'autre à l'arrière de la goélette *Manenil* amarrée au coffre. La distance D de la source au microphone, tout à fait constante dans ces conditions, était égale à 16 mètres.

La sonnerie, source de son pratiquement ponctuelle, réalisée par un battant de sonnerie électrique frappant le fond plat d'une boîte étanche qui le contenait, fut immergée successivement aux profondeurs de 1, 2 et 4 mètres.

Pour chacune de ces immersions, le champ sonore fut exploré plusieurs fois de la surface au fond de la mer, par un microphone I. P. M. immergé progressivement, de 50 en 50 centimètres.

Le microphone était intercalé dans un circuit de mesure Tissot, ce qui permettait de caractériser l'intensité du son en chacun des points successifs occupés par le microphone, en raison de la déviation de l'aiguille du galvanomètre correspondante.

Nous présentons sous forme de courbes quelques-uns des résultats obtenus : ces courbes sont construites en coordonnées rectangulaires, les déviations étant portées en abscisse et les profondeurs en ordonnée comptées à partir de 0 vers le bas.

Les courbes (1), (2) et (3) de la figure (51) correspondent à la sonnerie immergée à 1 mètre.

Les courbes (4), (5) et (6) de la figure (52) correspondent à la sonnerie immergée à 2 mètres.

Les courbes (7) et (8) de la figure (53) correspondent à la sonnerie immergée à 4 mètres.

Deuxième groupe de séries de mesures. — Les expériences de cette série, sont la reproduction sur une plus grande échelle des expériences de la série précédente; elles ont été faites par fond de 16 mètres, et pour des distances de la source au microphone, allant jusqu'à 200 mètres au lieu de 16 mètres dans les précédentes séries.

La goélette *Manenil* étant mouillée sur son ancre en baie de Bandol par fond de 16 mètres (Nature des fonds : sable), le poste microphonique (microphone et accessoires, circuit Tissot) était installé à bord.

La sonnerie était suspendue au bord d'un petit canot.

Un long filin flottant, portant pour cela de petites bouées de liège comme un filet de pêcheur, reliait l'un à l'autre le canot et la goélette; un marin, en ramant légèrement à bord du canot, assurait la tension du filin dont la longueur mesurait la distance D du poste sonore S au poste microphonique M .

La sonnerie restant immergée à la profondeur fixe de 3 mètres, le champ sonore fut exploré de la surface au fond de la mer, à des distances de la sonnerie successivement égales à 25, 50, 75, 100, 150 et 200 mètres.

Nous présentons sous forme de courbes quelques-uns des résultats

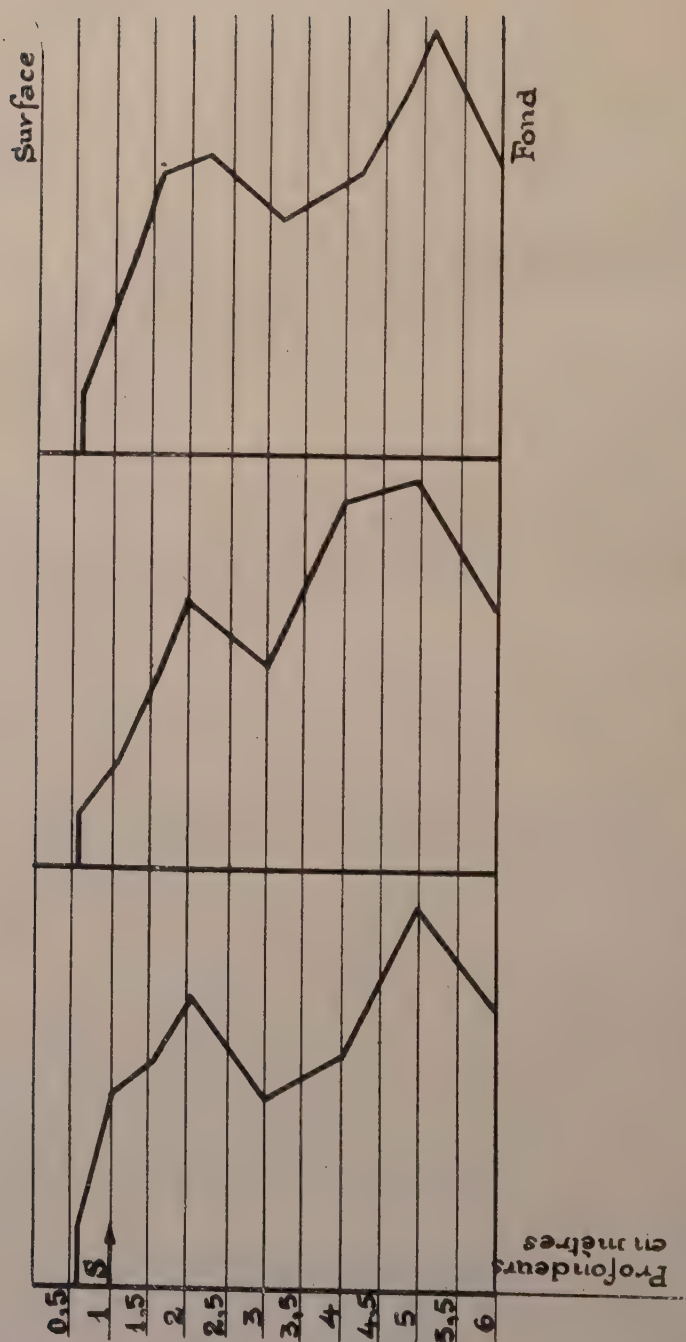


Fig. 31. — Répartition interférentielle du son d'une source fixe dans la mer.

Profondeur Sonnerie 1 mètre.

Distance Microphone-sonnerie 16 mètres.

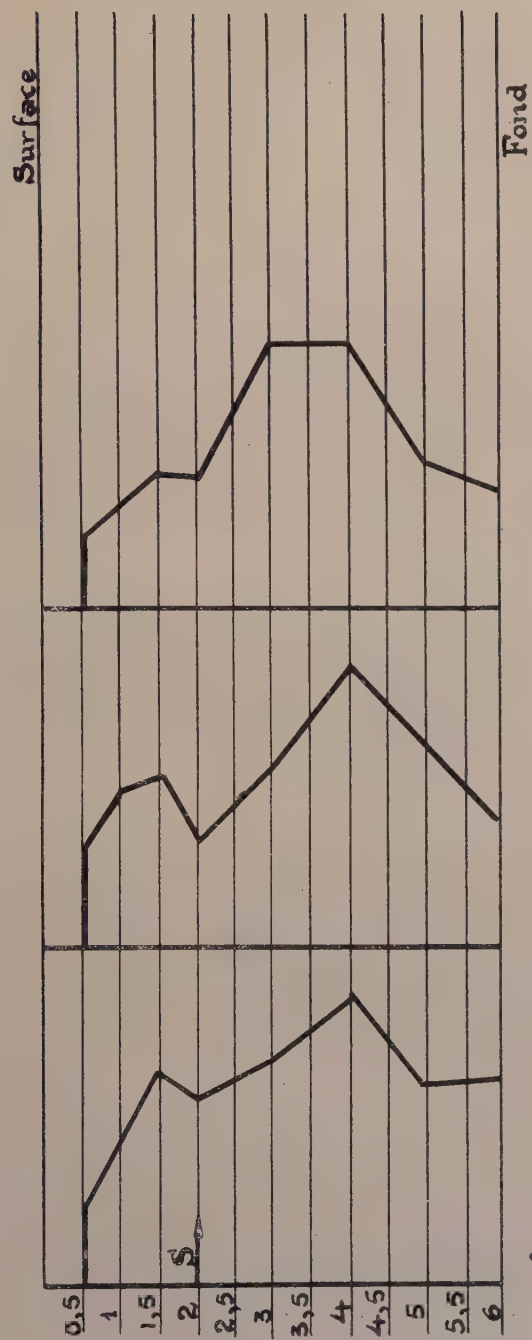


Fig. 32. — Répartition interférentielle du son d'une source fixe dans la mer.

Profondeur sonnerie 2 mètres.

Distance source-microphone 16 mètres.

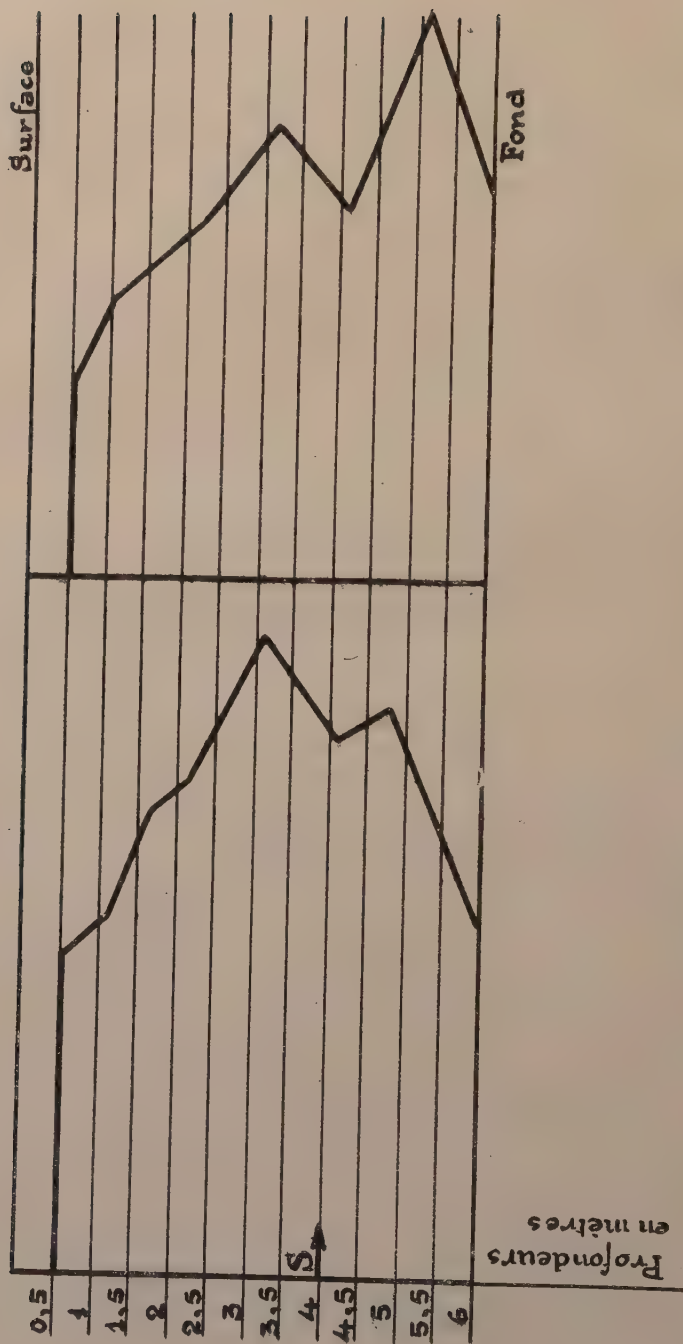


Fig. 33. — Répartition interférentielle du son d'une source fixe dans la mer.
 Profondeur sonnerie 4 mètres.
 Distance source-microphone 46 mètres.

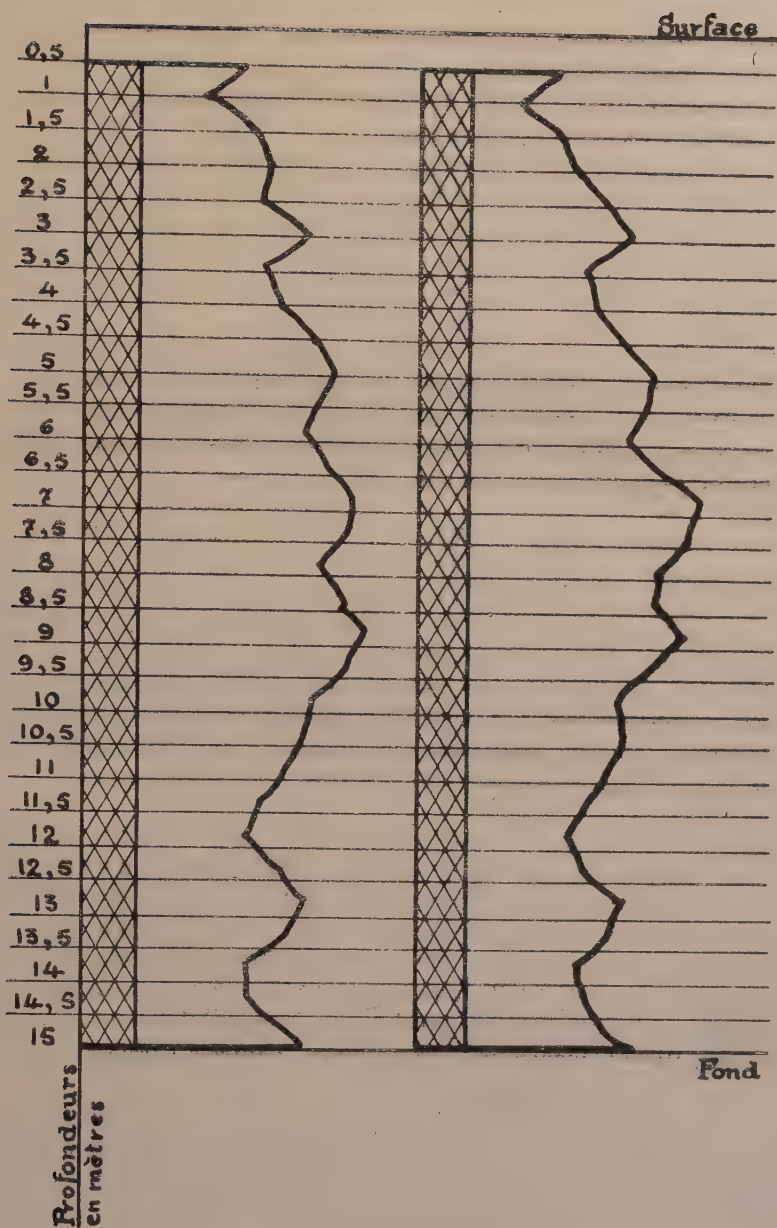


Fig. 34. — Répartition interférentielle de l'intensité du son d'une source fixe dans la mer.

Profondeur de la sonnerie 4 mètres.
Distance source-microphone 25 mètres.

obtenus; ces courbes sont construites dans les mêmes conditions que celles du groupe précédent.

Les courbes (9) et (10) de la figure (54) correspondent à $D = 25$ mètres, profondeur de la sonnerie, 4 mètres

Les courbes (11) et (12) de la figure (55) correspondent à $D = 75$ mètres, profondeur de la sonnerie, 3 mètres.

Les courbes (13) et (14) de la figure (56) correspondent à $D = 150$ mètres, profondeur de la sonnerie, 3 mètres.

Les courbes (15) et (16) de la figure (57) correspondent à $D = 200$ mètres, profondeur de la sonnerie, 3 mètres.

Nous avons vérifié que la valeur moyenne de l'intensité des bruits parasites, mesurée par la déviation de l'aiguille du galvanomètre lorsque la sonnerie était stoppée, était sensiblement la même à toutes les profondeurs. Une bande hachurée figure sur les courbes du second groupe, la valeur moyenne de l'intensité des bruits parasites.

EXAMEN DES COURBES. — D'une façon générale, les courbes mettent en évidence le phénomène interférentiel.

1° Il apparaît à l'observation des quelques courbes que nous présentons, que *l'intensité du son d'une source fixe immergée est très loin d'avoir la même valeur à toutes les profondeurs.*

2° Les 2 ou 3 courbes de chacune des figures correspondent à des conditions expérimentales identiques (même distance de la sonnerie au microphone, même profondeur d'immersion de la sonnerie). *Leurs maximums et minimums se correspondent remarquablement.*

La correspondance est particulièrement frappante pour les courbes du premier groupe (fig. 51, 52 et 53). Quelques décalages en profondeur, de 1 mètre au plus, pour des maximums qui se correspondent d'une courbe à l'autre sans aucun doute possible, sont à remarquer sur les courbes du 2^e groupe (fig. 54, 55, 56 et 57). Cela résulte des petites variations inévitables de la distance de la source au microphone, variations qui ne pouvaient se produire dans le cas où le microphone et la sonnerie étaient suspendus l'un à l'avant, l'autre à l'arrière de la goélette (1^{er} groupe de mesures).

Les décalages observés sont de l'ordre de grandeur prévu par la formule (5) exprimant la loi sur les interférences. En admettant une fluctuation de la distance D égale à 5 mètres pour $D = 200$ mètres, on a en effet :

$$\Delta y = K \frac{\lambda}{4d} \Delta D.$$

Soit, dans le cas du la₂ et pour le maximum d'intensité le plus voisin de la surface

$$\Delta y = \frac{0,80}{12} \times 5 = 0,35.$$

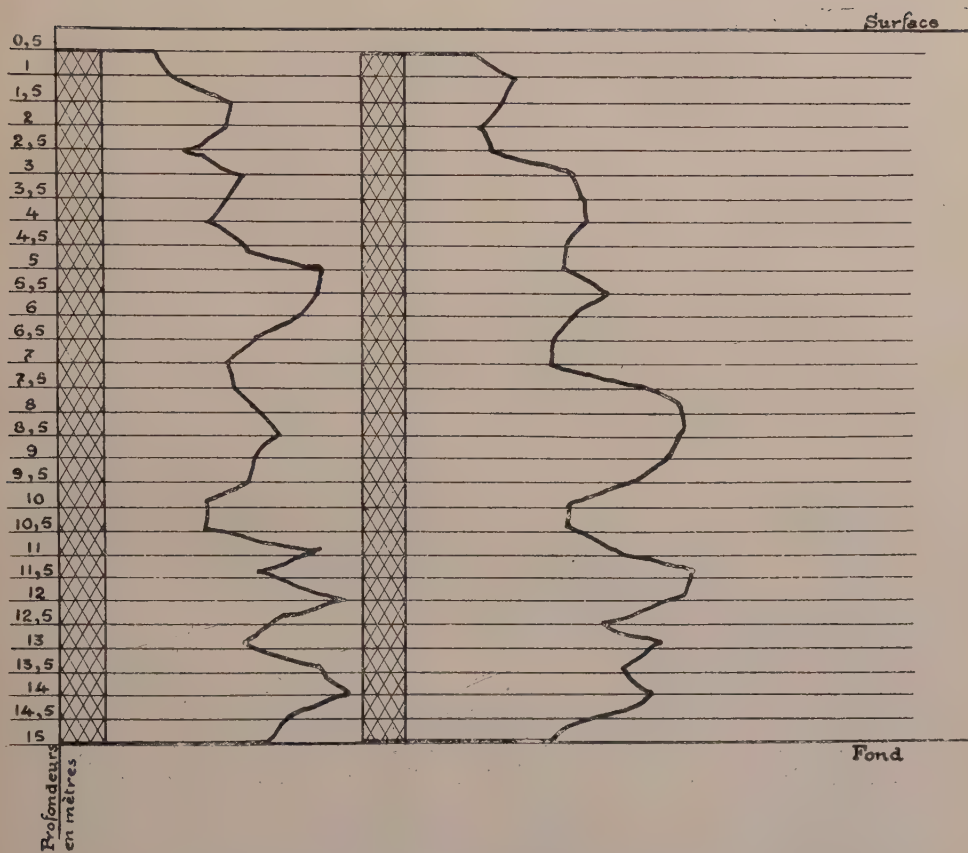


Fig. 35. — Répartition interférentielle de l'intensité du son d'une source fixe dans la mer.

Profondeur sonnerie 5 mètres.

Distance source-microphone 78 mètres.

5° *L'inégalité de l'intensité du son d'une source fixe, à diverses profondeurs, est un gros phénomène.* — On voit, par exemple, en examinant les courbes 1, 2, 5 de la figure 51 du premier groupe (les abscisses représentant les déviations de l'aiguille du galvanomètre sont portées à partir de 0 et non à partir d'une origine arbitraire) : que la déviation varie du simple au triple quand on passe de 0 m. 50 à 1 mètre, puis encore du simple au double quand on passe de 1 mètre à 2 mètres, soit au total une variation dans le rapport de 1 à 6 quand on passe de 0 m. 50 à 2 mètres.

4° *Les maximums nombreux et peu distincts pour la distance $SM = 25$ mètres (fig. 54), deviennent de plus en plus nets et espacés lorsque la distance SM augmente (fig. 55, 56, 57).*

5° *La surface de la mer est dans tous les cas région d'intensité minimum.*

6° L'importance du phénomène interférentiel ne doit pas surprendre; nous avons déjà signalé à propos des appareils de direction I. P. M., au début du chapitre IV, que la réflexion du son propagé dans l'eau, sur la surface de séparation de l'eau et de l'air est presque totale.

Au système interférentiel de la source et de son image par réflexion sur la surface eau-air, se superposent certainement le système interférentiel de la source et de son image par réflexion sur le fond de la mer d'une part, et d'autre part, le système interférentiel des sources secondaires, images de la source principale, par réflexion sur la surface et sur le fond de la mer.

Le premier de ces 3 systèmes interférentiels est prépondérant. Certes, le son se réfléchit sur le fond de la mer; nous savons même que le temps qui sépare les instants de l'émission d'un choc et de la perception de l'écho, a pu servir à mesurer la profondeur des mers; mais, nous savons que *la réflexion sur le fond de la mer n'est que partielle*, et qu'elle est fonction d'un coefficient dépendant de la nature des fonds qui peuvent être plus ou moins réfléchissants.

En fait, les phénomènes d'interférence dus à la réflexion du son sur le fond de la mer, n'apparaissent pas sur nos courbes; peut-être cependant expliquent-ils la diminution d'intensité au voisinage du fond de la mer, dans le cas des courbes du 1^{er} groupe (fig. 51, 52, 55). Ils jouent le rôle d'un phénomène atténuant les contrastes du phénomène prépondérant, cela plus ou moins selon que le fond de la mer est plus ou moins réfléchissant, de même qu'une lumière parasite lave de blanc et atténue les contrastes de la projection d'un cliché photographique.

7° Parlant d'interférences, et par rapprochement avec le phénomène des franges de Fresnel, on peut s'étonner de ne pas trouver sur les courbes une série de maximums équidistants. Cela s'explique simplement : une différence profonde existe entre le phénomène optique et le phénomène acoustique; alors qu'en optique les longueurs d'ondes visibles sont comprises entre les valeurs extrêmes 0 μ , 4 et 0 μ , 7, dont le rapport est égal à 1,7, les diverses longueurs d'ondes acoustiques émises par

notre source dont le bruit était loin d'être un son pur, se répartissaient certainement dans plusieurs octaves, précisons pour fixer les idées, entre les valeurs extrêmes de 0 m. 40 (λ_2) et de 4 m. 40 (λ_6) dont le rapport est égal à 11. A chaque longueur d'onde correspond un système interférentiel à maximums équidistants; *les systèmes interférentiels correspondant aux diverses longueurs d'ondes, se chevauchent*; c'est ce qui explique que quelques franges noires seulement soient perceptibles en lumière blanche, dans le cas du phénomène de Fresnel, et que l'aspect des maximums équidistants n'apparaisse pas dans le cas du phénomène acoustique.

8° Les courbes permettent enfin une vérification quantitative de la formule exprimant la loi des interférences. On reconnaît en effet que pour une même immersion de la source, *la profondeur des maximums d'intensité de même ordre observés sur diverses courbes, relatives à diverses distances de la source au microphone, est proportionnel à cette distance*. Le groupement en une seule figure (fig. 58) des courbes numérotées 17, 12, 15, 15, relatives aux distances SM égales à 25, 75, 150 et 209 mètres et à une même immersion de la sonnerie à 5 mètres de profondeur, facilite l'observation et supplée à une longue explication

INFLUENCE DU PHÉNOMÈNE INTERFÉRENTIEL SUR L'ÉCOUTE SOUS-MARINE. — Le phénomène interférentiel a une grande importance; il domine certainement toute la question de l'écoute sous-marine et permet d'expliquer diverses observations que nous allons citer :

1° *Les changements d'immersion d'un sous-marin ont pu être confondus dans certaines conditions avec ses stoppages ou mise en marche. Le fait a été signalé et expliqué au début du présent chapitre.*

L'utilisation de *files verticales de prises de son* est seule susceptible d'éviter les discontinuités de l'écoute résultant fatalement, dans le cas d'une prise de son unique, du passage de cette dernière dans les minimums interférentiels.

Trois ou quatre microphones montés en parallèle, et répartis verticalement sur une largeur de trois ou quatre mètres, donneraient d'excellents résultats; *les files verticales de 7 capsules des réseaux plans* de M. J. Perrin présentent de l'intérêt plus à ce point de vue qu'à celui de l'augmentation de l'intensité du son perçu.

2° *Des appareils d'écoute très différents les uns des autres se sont montrés sensiblement identiques chaque fois qu'ils furent comparés méthodiquement, dans des conditions expérimentales identiques (pour une même profondeur d'immersion).* La portée des appareils d'écoute est en effet limitée par la distance à laquelle le maximum d'intensité le plus voisin de la surface, correspondant à la plus aiguë des longueurs d'ondes émises par la source sonore, coïncide avec la position du microphone.

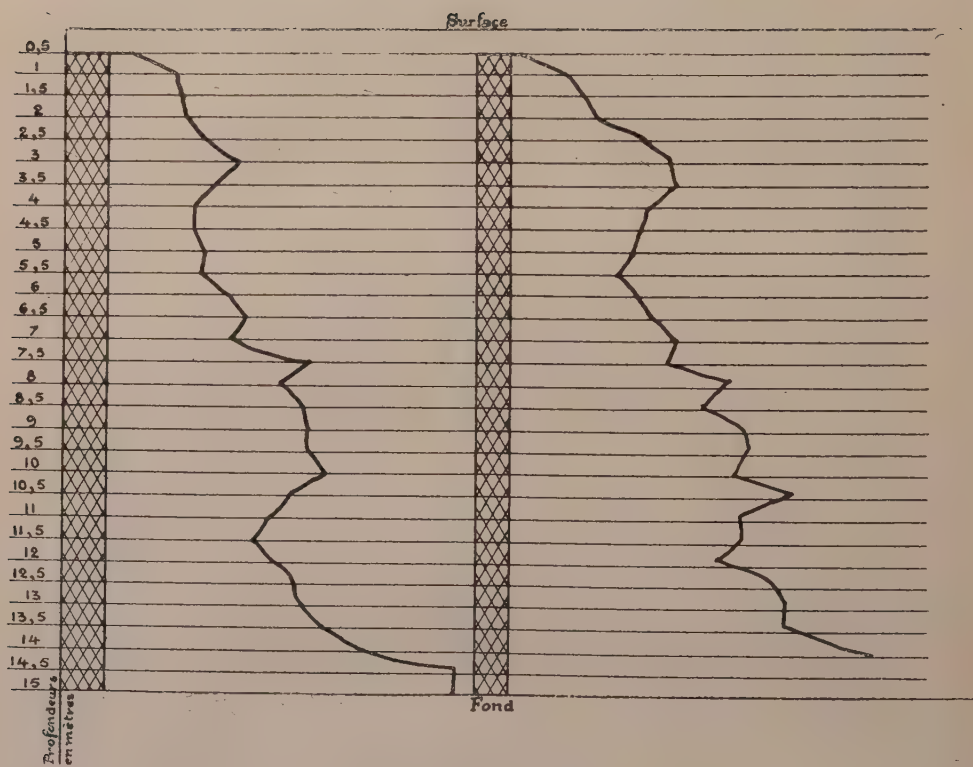


Fig 36

Fig. 36. — Répartition interférentielle de l'intensité du son d'une source fixe dans la mer.

Profondeur de la sonnerie 3 mètres.
Distance sous-microphone 150 mètres.

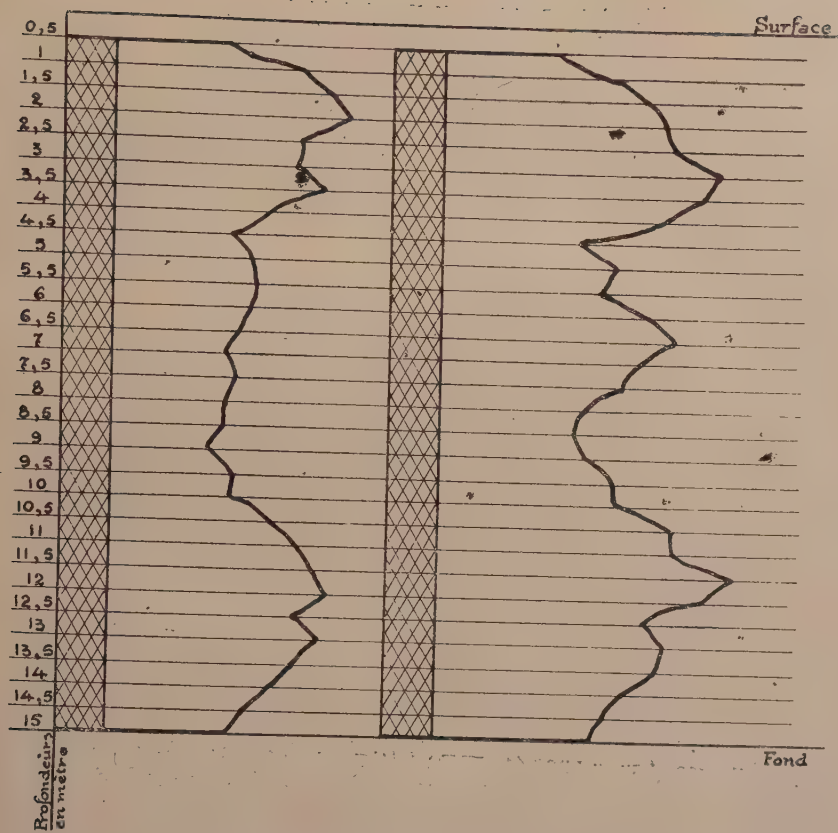


Fig. 37. — Répartition interférentielle du son d'une source fixe dans la mer.
 Profondeur sonnerie 3 mètres.
 Distance source-microphone 200 mètres.

Il y a donc peu à attendre au point de vue de l'augmentation de la portée d'écoute, d'une amélioration des appareils actuellement construits.

3° *Les bruits aigus sont perceptibles à des distances plus considérables que les bruits graves.* Il y a donc avantage à rechercher l'écoute des bruits les plus aigus émis par les navires. Un accord du son propre des appareils d'écoute, dans le quatrième octave, répond le mieux aux besoins courants.

4° *La portée d'un appareil d'écoute est d'autant plus grande que cet appareil est plus profondément immergé.* Une immersion éloigne en effet les appareils d'écoute du minimum d'intensité qui coïncide avec la surface pour toutes longueurs d'onde.

L'immersion profonde est irréalisable dans le cas d'appareils de coque montés sur bâtiments de faible tirant d'eau. En fait aucun appareil de ce genre n'a donné, à notre connaissance, de résultats satisfaisants. L'immersion de l'appareil Walser à 5 m. 50 de profondeur, est à peine suffisante et M. le commandant Barthélemy, guidé par une longue expérience de l'écoute sous-marine, fut conduit à demander que des microphones destinés à être mouillés en « plomb de sonde » fussent distribués aux chalutiers munis des appareils Walser, pour leur faciliter la surveillance et la prise de contact des sous-marins.

L'écoute à bord des sous-marins en plongée est la plus favorable à l'obtention des longues portées (longues portées obtenues avec les hydrophones S. P. M).

5° *La distance maximum à laquelle peut être perçu un sous-marin est d'autant plus grande que le sous-marin est plus profondément immergé.*

6° *La distance maximum à laquelle peut être perçu un bâtiment de surface, est d'autant plus grande que ce bâtiment a un fort tirant d'eau.* Une vedette électrique ou automobile n'est pas perceptible à de grandes distances.

7° Le paragraphe précédent peut être résumé dans les termes suivants : la portée de l'écoute est d'autant plus faible que la source sonore est plus rapprochée de la surface ; on comprend en effet que la résultante des émissions, en discordance de phase, de la source d'une part, et de son image d'autre part tende vers 0 en tous points du champ sonore, quand la source et son image se rapprochent l'une de l'autre.

A la limite : lorsque la source vient à se confondre avec la surface réfléchissante, l'image de la source par réflexion disparaît nécessairement, seule subsiste l'émission de la source sonore elle-même. Une brusque discontinuité apparaît dans l'aspect de l'évolution du phénomène ; la portée de

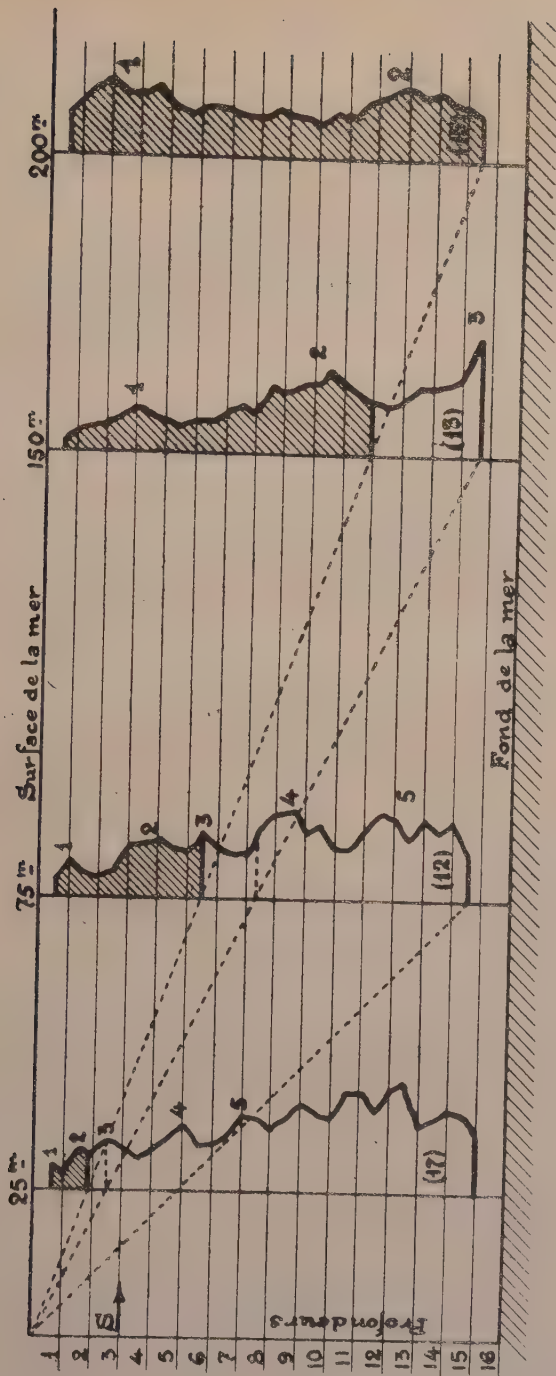


Fig. 38. — Répartition interférentielle du son d'une source fixe immergée à 3 mètres de profondeur, à différentes distances de la source.

l'écoute, de presque nulle qu'elle était, devient brusquement considérable pour tous les sons, graves et aigus.

Tel est le cas d'un cargo allège dont les pales de l'hélice battent la surface de la mer. Tel est le cas d'un sous-marin marchant en surface à l'aide de ses moteurs Diesel, ou stoppé chargeant ses accumulateurs (le fonctionnement des moteurs Diesel ébranle toute la coque qui entre en vibration). Tel est le cas enfin d'un navire quelconque dont la coque est ébranlée par un choc violent, que ce choc soit volontaire (machines à river) ou qu'il soit involontaire et dû au mauvais fonctionnement des machines ou d'un auxiliaire.

APPRÉCIATION DES DISTANCES. — La profondeur du maximum d'intensité le plus voisin de la surface, relatif à une longueur d'onde déterminée, permettrait de connaître la distance qui sépare les appareils d'écoute et le sous-marin, si l'on connaissait la profondeur d'immersion de ce dernier. On a en effet d'après l'égalité (3) :

$$D = \frac{4dy}{\lambda}.$$

On connaît une limite maximum de la profondeur d'immersion des sous-marins; cette limite est de 40 mètres avec les bâtiments modernes; la formule précédente fixe donc une limite maximum de la distance D .

$$D = \frac{4 \times 40 \times y}{\lambda}.$$

Pratiquement, il serait malaisé et peu rapide de chercher la profondeur d'un maximum d'intensité correspondant à une longueur d'onde déterminée. Nous notons d'autre part qu'il importe surtout de savoir si un sous-marin poursuivi se trouve à l'intérieur des limites du champ d'action des engins destructeurs dont on dispose; nous pensons qu'à ce point de vue, l'emploi d'un dispositif simple consistant en un microphone de son propre, grave et peu amorti (on sait réaliser un tel microphone) dont l'immersion serait fixe et peu profonde, présenterait un grand intérêt.

Pour fixer les idées :

Un observateur qui percevrait nettement le bruit d'un sous-marin poursuivi, à l'aide d'un microphone dont le son propre serait compris dans le troisième octave ($\lambda = 5$ m. 20 pour le λ_3) et qui serait immergé à 1 m. 50 de profondeur, pourrait affirmer que le sous-marin évolue à moins de 75 mètres du microphone.

On a en effet :

$$D = 4 \times 40 \times \frac{1,50}{5,20} = 75.$$

B. — Fluctuation de la Température dans la Mer. Mirages Acoustiques.

Le phénomène interférentiel n'explique pas l'inégalité si souvent observée en Méditerranée, des résultats de l'écoute sous-marine, en été et en hiver; inégalité signalée en particulier par M. le Commandant Barthélemy dans les termes suivants :

« La portée de l'appareil I. P. M. est de 2 000 mètres environ. Pendant la saison froide et dans des conditions favorables de mer et de nature des fonds, la portée peut atteindre et même dépasser 3 000 mètres. Pendant la saison chaude elle peut descendre en-dessous de 1 500 mètres. »

On pensa que *des phénomènes analogues aux mirages* devaient se produire en été, par suite des fluctuations de la température de la mer au voisinage de la surface, ces fluctuations devant être plus importantes en Méditerranée qu'en rade de Brest où les écarts de température sont moins considérables, et où la mer est brassée par le flux et le reflux des marées. Les physiciens qui pratiquaient l'écoute sous-marine en rade de Brest ont effectivement obtenu de plus longues portées d'audition que ceux qui travaillaient en Méditerranée, les uns et les autres employant des appareils identiques, bien entendu.

Mesures. — Je me proposai de faire quelques mesures pour connaître l'ordre de grandeur des fluctuations de la température dans la mer en fonction de la profondeur, cela à différentes heures du jour, et à diverses époques de l'année. M. le Lieutenant de vaisseau Lemaire fit exécuter les mesures par le personnel du centre d'études.

Par fond de 30 mètres, en baie de Bandol, 5 thermomètres furent immergés presque journellement pendant 2 mois de suite. Les thermomètres étaient fixés sur un même bout suspendu à un flotteur en liège, de telle façon que le premier thermomètre fût immergé à quelques centimètres seulement de la surface, le deuxième à 4 mètres, le troisième à 8 mètres, le quatrième à 12 mètres et le cinquième à 16 mètres. Chaque jour à 8 heures, 12 heures et 16 heures, les thermomètres étaient relevés et les températures notées. Pour éviter que la température des thermomètres pût se modifier pendant la durée des opérations de relevage et de lecture, leur capacité calorifique avait été augmentée en plaçant chacun d'eux à l'intérieur d'un ballon en verre, rempli d'eau, d'une capacité de 500 cm³ environ.

Nous reproduisons ci-dessous 2 courbes de nos cahiers d'expériences (fig. 39). Les températures sont portées en ordonnée.

Une autre série de mesures fut effectuée par M. le Lieutenant de vais-

26 Septembre

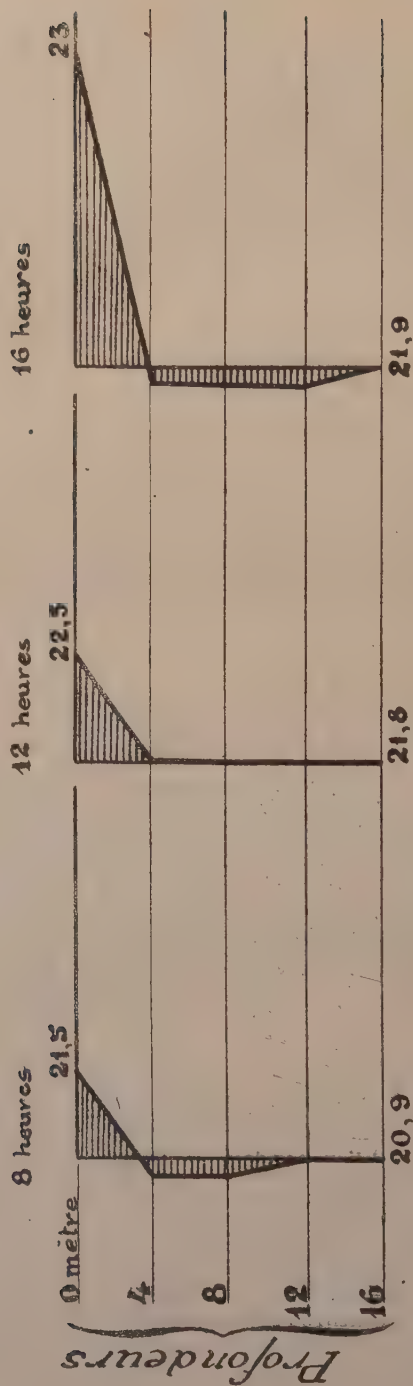


Fig. 59. — Fluctuation de la température dans la mer.

8 Novembre

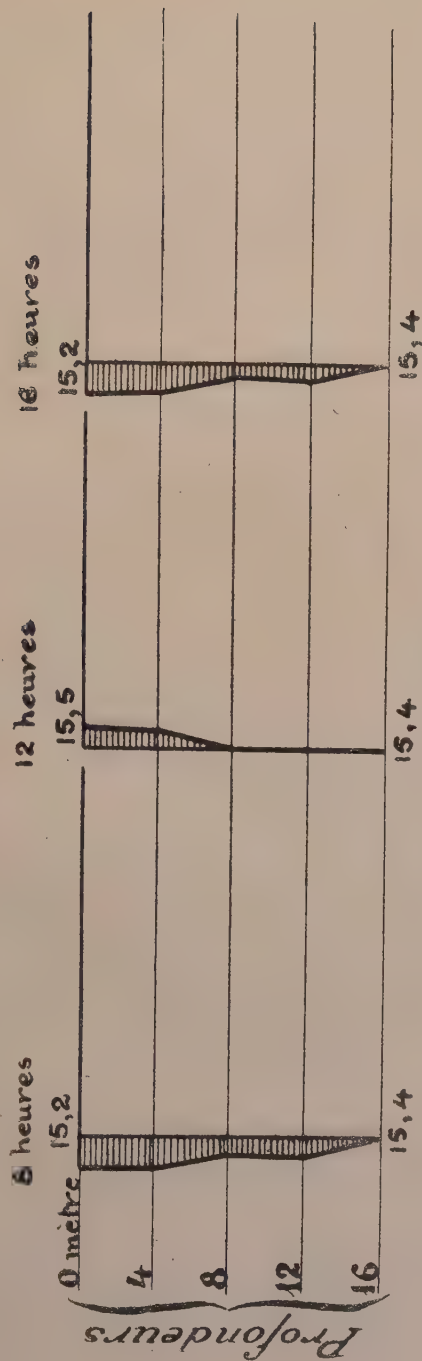
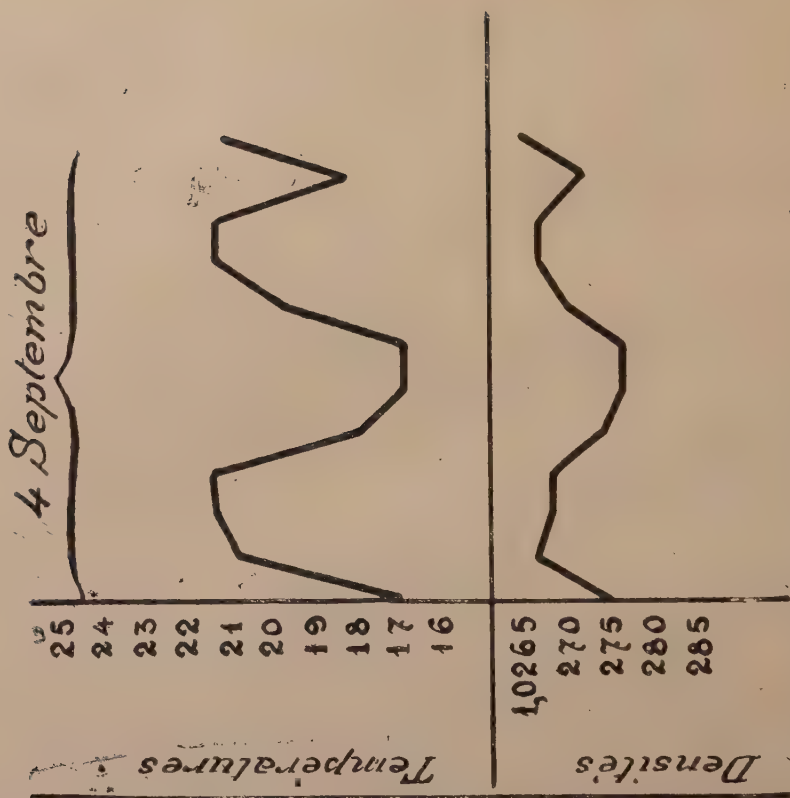


Fig. 39 bis. — Fluctuation de la température dans la mer.



Heures	Profondeur	Température
5	Surface	17
↓	7	21
	9	21,5
	15	21,5
	20	18
	25	17
	20	17
↓	15	20,5
	10	21,5
	Surface	21,5
	20	18,5
7 h.	9	21,5

Fig. 40. — Correspondance des fluctuations de température et de densité dans la mer.

seau Lorfèvre, commandant du sous-marin *Andromaque*, au cours des plongées de son bâtiment dans les eaux de Toulon. Les mesures de M. Lorfèvre portèrent sur la température et la densité de l'eau de mer. On voit sur l'une des courbes de correspondance ci-dessous reproduite (fig. 40) que les fluctuations de densité sont notables et sensiblement proportionnelles aux fluctuations de température; il en résulte, et cela n'était pas évident, que les fluctuations de densité dans la mer ne sont pas dues à des fluctuations de concentration.

Résultats. — En Méditerranée, la température est uniforme à $0^{\circ},2$ près à moins de 40 mètres de profondeur, à partir des mois d'octobre et surtout de novembre; au contraire des fluctuations de 2 ou 3 degrés sont fréquentes surtout au voisinage de la surface pendant les mois d'août et de septembre, et probablement d'une façon plus générale pendant les mois d'été. Les fluctuations de la température ont une valeur maximum vers le milieu de la journée, et minimum le matin.

Conclusions. — Il est avantageux d'immerger les appareils d'écoute aussi profondément que possible pour les éloigner de la région superficielle où les fluctuations de température sont les plus importantes. Cette condition était déjà imposée par la nécessité d'éloigner les appareils d'écoute du minimum interférentiel d'intensité du son, qui coïncide avec la surface pour toutes les longueurs d'onde.

Un sous-marin poursuivi par des bateaux écouteurs pourrait avoir avantage, parfois, pour échapper à ses adversaires, à diminuer la portée de leur écoute en naviguant en plongée, périscope bas, bien entendu, mais à faible profondeur d'immersion; il utiliserait ainsi à son profit, en été, l'influence fâcheuse de la zone des fluctuations de température, et du même coup, augmenterait la profondeur des maximums interférentiels d'intensité des sons émis par son hélice.

CONCLUSIONS

ÉCOUTE. — Les bruits des navires sont constitués par un ensemble de bruits et de sons plus ou moins amortis, avec prédominance d'une fréquence musicale, variable d'un bâtiment à l'autre. Les bruits parasites comprennent également des bruits et des sons dont les fréquences sont souvent voisines de celles des sons émis par les navires. Dans ces conditions, l'application des phénomènes de résonance ne peut qu'exceptionnellement améliorer les conditions de l'écoute sous-marine.

Les méthodes objectives d'observation consistant en la substitution d'un galvanomètre à aiguille et cadran aux téléphones d'un appareil d'écoute, sont pratiquement inutilisables pour la détection des sous-marins en raison de l'impossibilité d'interpréter les mouvements de l'aiguille. Elles constituent un procédé de mesures que nous avons utilisé pour l'étude des phénomènes acoustiques dans l'eau : propriétés directives des appareils I. P. M. et exploration du champ sonore d'une sonnerie étanche immergée.

Une audition nette et détaillée nécessite l'amortissement du son propre des appareils d'écoute. Elle permet en les identifiant, de distinguer les uns des autres les bruits des navires et les bruits parasites. Les microphones I. P. M. et les hydrogéophones S. P. M. ont un son propre très amorti; ils ne résonnent pas et sont fidèles. Les microphones I. P. M. sont pourvus d'un dispositif original qui les rend insensibles aux variations de la pression hydrostatique résultant de la houle et du roulis. Ils permettent une audition continue, même par mauvais temps.

On a vu comment, par un choix rationnel des inerties et des amortissements, on peut se rendre maître de la fidélité de l'écoute, soustraire complètement les microphones à l'influence fâcheuse des variations de la pression hydrostatique résultant de la houle et du roulis, étaler plus ou moins l'intervalle de leur sensibilité, et choisir la fréquence correspondant à leur maximum de sensibilité.

DIRECTION. — Les appareils de direction *par maximum* : appareils I. P. M., appareils Walser et réseaux Perrin ne perçoivent nettement que les bruits dont l'origine est comprise dans leur angle de sensibilité; par ce fait même, ils atténuent les bruits parasites dont l'origine est extérieure à cet angle. L'hydrophone I. P. M., appareil à maximum, est le premier appareil qui permet à un bâtiment de surface de

chasser les sous-marins en pratiquant l'écoute dirigée. L'appareil Walser est incontestablement l'appareil actuel possédant la plus grande valeur militaire.

Les appareils à *écoute binauriculaire* sont plus précis pour la recherche de la direction que les appareils à maximum. L'angle de sensibilité de chacune des 2 prises de son élémentaires qui constituent les tubes C des Américains et les stéthoscopes de MM. Villard et Abraham, embrasse tout l'horizon ; il en résulte que les bruits parasites ne sont pas atténués et que ces appareils sont inférieurs par mauvais temps aux appareils de direction par maximum. Il n'en est pas de même des hydrogéophones S. P. M. qui, appliqués intérieurement contre les tôles inférieures des sous-marins se trouvent abrités des bruits parasites émis à la surface dans leur voisinage immédiat.

INTERFÉRENCES. — On a vu que le problème de l'écoute sous-marine se complique singulièrement en raison de l'existence dans la mer des phénomènes interférentiels dus principalement à la composition des mouvements vibratoires directs, et réfléchis par la surface de la mer, issus des sources sonores immergées. Le phénomène comporte au voisinage de la surface une région où l'intensité sonore est minimum, ce qui correspond à la coïncidence d'une frange noire avec la surface réfléchissante dans le cas des franges d'interférence de Fresnel en optique.

Nous avons donné des indications sur l'importance quantitative du phénomène et en avons déduit des conclusions importantes en ce qui concerne l'écoute sous-marine, à savoir que :

La portée des appareils d'écoute est limitée en dehors de la qualité même des appareils : Pour une même profondeur d'immersion, les appareils à écoute directe et les appareils microphoniques les plus divers, montés ou non sur amplificateurs se sont montrés pratiquement équivalents au point de vue de la portée.

Les observateurs ont pu prendre pour des stoppages ou mises en marche, les changements d'immersion d'un sous-marin.

Les bruits aigus sont perceptibles à de plus grandes distances que les bruits graves.

Les petites embarcations, si puissantes que soient leurs machines, ne sont pas entendues à des distances aussi grandes que les bâtiments de fort tirant d'eau. Les sous-marins immergés peuvent être entendus exceptionnellement à des distances considérables.

L'adaptation des appareils d'écoute sous-marine au phénomène naturel de la répartition interférentielle du son dans l'eau comprend : une immersion profonde des appareils, l'accord de leur son propre sur une fréquence élevée, et l'emploi de files verticales de prises de son.

La position des maximums interférentiels d'intensité correspondant à une fréquence musicale connue, peut servir de base à l'appréciation de

la distance maximum qui sépare un sous-marin immergé des appareils qui l'écoutent.

TEMPÉRATURE. — La portée de l'écoute sous-marine, déjà limitée par la position des maximums interférentiels correspondant aux sons émis par le bâtiment écouté, est encore réduite, certains jours d'été, par suite des phénomènes de « *mirages acoustiques* » causés par les fluctuations de la température de la mer au voisinage de sa surface.

SECONDE THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Couches minces sur l'eau (huiles, résines, camphre.)

Vu et approuvé :

Paris, le 3 Juin 1920.

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,
F. HOUSSAY

Vu et permis d'imprimer :

Paris, le 3 Juin 1920.

LE RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,

